O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI OLIY VA
O'RTA MAXSUS TA'LIM VAZIRLIGI

J. S. SALIMOV, N. B. PIRMATOV

ELEKTR MASHINALARI

Texnika oliy o'quv yurtlarining «Elektr texnikasi, elektr mexanikasi va elektr texnologiyalari» yo'nalishi talabalari uchun darslik

4/5935
TDTU ..OSIY
ARM (KUT..DXONA)

O'ZBEKISTON FAYLASUFLARI
MILLIY JAMIYATI NASHRIYOTI
TOSHKENT – 2011

UDK: 681.3(075)
BBK 30.61 ya 73
S26

Salimov, J.S., Pirmatov N.B.

Elektr mashinalari: Texnika oliy o'quv yurtlarining *«Elektr texnikasi, elektr mexanikasi va elektr texnologiyalari»* yo'nalishi talabalari uchun darslik /J.S. Salimov, N.B. Pirmatov. O'zbekiston Respublikasi Oliy va o'rta maxsus ta'lim vazirligi. — T.: O'zbekiston faylasuflari milliy jamiyati nashriyoti, 2011. — 408 b.

I. Pirmatov, N.B.

ISBN 978-9943-391-19-2

UDK: 681.3(075)
BBK 30.61 ya73
S26

Darslikda turli sohalarda keng qo'llaniladigan transformatorlar, asinxron, sinxron va o'zgarmas tok mashinalarining tuzilishi, ishlash prinsipi, ularda bo'ladigan asosiy fizik jarayonlari va ish rejimlarini bayon etishda malakali mutaxassislar tayyorlash dasturiga mos holda amaliyot nuqtayi nazaridan yondashilgan. Elektr mashinalari va transformatorlarni me'yoriy rejimda tejamli ishlatish uchun muhim bo'lgan amaliy tavsiyalar keltirilgan.

Darslikdan texnika oliy o'quv yurtlarining «Elektroenergetika» va «Energetika» yo'nalishlari talabalari, elektroenergetika sohasiga oid kollejlarda ta'lim olayotgan o'quvchilar hamda xizmat doirasi elektr mashinalari va kuch transformatorlarining ekspluatatsiyasi hamda ta'mirlashi bilan bog'langan mutaxassislar ham foydalanishlari mumkin.

Taqrizchilar: dots, t.f.n. X.A. Mushegyans
dots, t.f.n. U.T. Berdiyev

ISBN 978-9943-391-19-2

© O'zbekiston faylasuflari milliy jamiyati nashriyoti, 2011.

SO'ZBOSHI

Kelajakning negizi bo'lgan yuksak malakali kadrlar tayyorlash uchun xalqaro standart talablari asosida ishlab chiqarilgan elektr mashinalariga oid yetarli darajada ma'lumotlarni qamrab olgan darslik va o'quv qo'llanmalar yaratish hozirgi kunning dolzarb masalalaridan biridir.

Elektr mashinalari va transformatorlari sanoatning turli ishlab chiqarish korxonalarida, energetikada, transportda (aviatsiya, temiryo'l, avtomobil, metro, tramvay, trolleybus), qishloq va suv xo'jaligida, qurilishda va boshqa sohalarda keng qo'llaniladi.

Darslik texnika oliy o'quv yurtlarining «Elektr texnikasi, elektr mexanikasi va elektr texnologiyalari» yo'nalishi talabalari uchun «Elektr mashinalari» fanining dasturi asosida yozilib, uning mazmuni: transformatorlar, asinxron mashinalar, sinxron mashinalar va o'zgarmas tok mashinalari ketma-ketligida bayon qilingan. Ularning tuzilishi, ishlash prinsipi, asosiy xossalari va xarakteristikalari amaliyot nuqtayi nazaridan yondashilgan holda bayon etilgan. Yangi turdagi elektr mashinalariga oid umumiy ma'lumotlar ham kitobning tegishli bo'limlarida o'z aksini topgan. Ishlash prinsipi elektromagnit induksiya hodisasiga asoslanganligi hamda ulardagi elektromagnit jarayonlar ko'p jihatdan elektr mashinalarinikiga o'xshashligi sababli transformatorlar ham «Elektr mashinalari» kursida o'rganiladi.

Mualliflar darslikni batafsil taqrizdan o'tkazgan: «O'zbekenergo» kompaniyasi «O'zenergosozlash» UK «Elektr uskunalarini sozlash va ekspluatatsiya qilish» sexining boshlig'i, dots., t.f.n. *X.A. Mushegyansga*, TTYMI ning «Elektr transporti» kafedrasi xodimlari va uning kafedra mudiri, dots., t.f.n. *U.T. Berdiyevga*, o'zining maslahatlari bilan darslikning sifatini yaxshilashga yordam qilgan Xalqaro Elektrotexnika Akademiyasining haqiqiy a'zosi, TDTUning «Elektr stansiyalari, elektr tarmoqlari va tizimlari» kafedrasi professori, t.f.d. *Q.R. Allayev*ga va A.R. Beruniy nomidagi Davlat mukofoti sovrindori, TDTUning «Elektr texnikasi, elektr mexanikasi va elektr texnologiyalari» kafedrasi mudiri, prof., t.f.d., *O.O. Hoshimovga* o'zlarining chuqur minnatdorchiligini bildiradilar.

Mualliflar

KIRISH

K.1. Elektr mashinalari haqida umumiy ma'lumotlar

Elektr mashina mexanik energiyani elektr energiyaga (*elektr generatorlari*) yoki elektr energiyani mexanik energiyaga (*elektr motorlari*) aylantira oladigan elektr-mexanik o'zgartgich (EMO')dir. Elektr mashinalarida energiyaning elektr-mexanik o'zgartirilishi magnit maydon vositasida amalga oshirilib, *elektromagnit induksiya qonuniga asoslangan*; shuning uchun ham ularni *induktiv elektr mashinalari* deyiladi. O'zgaruvchan tok kuchlanishini o'zgartirib beruvchi ***transformatorlar*** ham induktiv elektr mashinalarining o'ziga xos turidir.

Elektr-mashinaviy o'zgartgichlar (masalan, o'zgaruvchan tok chastotasini va fazalar sonini o'zgartira oladigan) va kam quvvatli elektr signallar vositasida nisbatan katta quvvatli obyektlarni boshqarishga imkon beruvchi *elektr-mashinaviy kuchaytirgichlar* ham EMO' hisoblanadi.

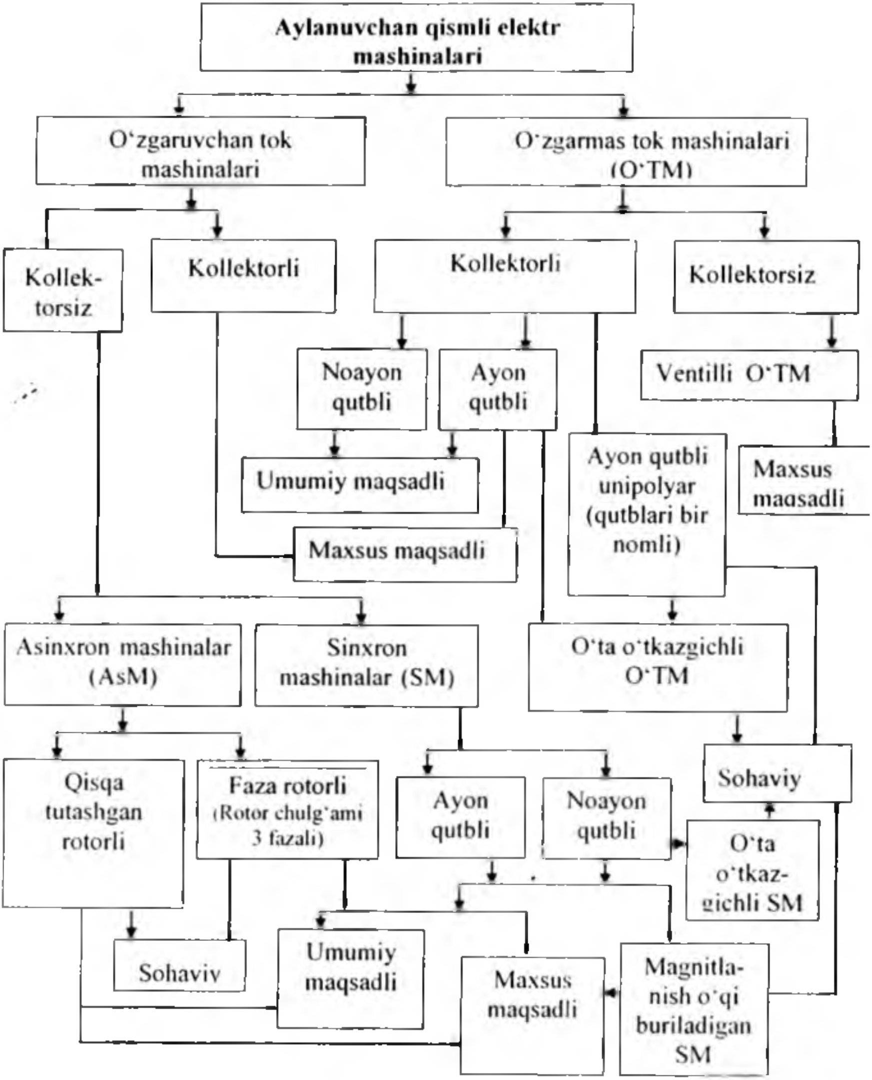
Sanoat elektronikasining jadal ravishda rivojlanishi tufayli yarim o'tkazgich (tranzistor, tiristor)li o'zgartgichlar va kuchaytirgichlar sanoatda keng qo'llanilmoqda. Natijada elektr-mashinaviy o'zgartgichlar va kuchaytirgichlarni amalda qo'llash sohalari ancha kamaygan.

Elektr mashinalarining tasnifi. *Aylanuvchi qismli elektr mashinalari* tokning turiga ko'ra *o'zgaruvchan* va ***o'zgarmas tok*** mashinalariga bo'linadi. *O'zgaruvchan tok elektr mashinalari* ishlash prinsipiga bog'liq holda ***asinxron***, ***sinxron*** va *kollektorli* mashinalarga bo'linadi (K.1-rasm).

Asinxron mashinalar tuzilishi, ishga tushirish va texnik xizmat ko'rsatishning oddiyligi hamda yuksak ishonchliligi kabi afzalliklari tufayli turli xo'jalik sohalarida asosan elektr motorlari sifatida ishlatiladi.

Sinxron mashinalar elektr stansiyalarida sanoat chastotali ($f = 50$ Gz) o'zgaruvchan tok ishlab chiqaruvchi generatorlar va mustaqil elektr energiya iste'molchilari (samolyotlar, katta kemalar va boshq.) uchun yuqori chastotali generatorlar sifatida qo'llaniladi.

O'zgaruvchan tok kollektorli mashinalari asosan elektr motorlari sifatida ishlatiladi. Ularning konstruksiyasi murakkab va cho'tka-kollektor qurilmasining tez-tez profilaktik ko'zdan kechirish (yoki ta'mirlash) zaruratining tug'ilib turishi tufayli ulardan amalda kam foydalaniladi. Avtomatika qurilmalarida hamda maishiy xizmat va uy xo'jaligi elektr uskunalarida universal, ya'ni o'zgaruvchan va o'zgarmas toklarda ishlay oladigan kollektorli mashinalar qo'llaniladi.



K.1–rasm. Aylanuvchi qismli induktiv elektr mashinalarining tasnifi va qanday maqsadlarda qo'llanilishiga oid sxema

O'zgarmas tok mashinalari ko'pchilik hollarda elektr motorlari sifatida aylanish chastotasi keng ko'lamda o'zgartirilishi talab qilinadigan elektr yuritma qurilmalarida ishlatilib, avtomatik rostlash sistemalarida esa ijrochi motorlar va taxogeneratorlar sifatida keng foydalaniladi.

Transformator — o'zgaruvchan tok kuchlanishini o'zgartiradigan (bu jarayonda chastota f = const) statik (aylanuvchi qismi bo'lmagan) elektromagnit o'zgartgichdir. Lekin transformatorning ishlash prinsipi ham elektr mashinalariniki singari elektromagnit induksiya hodisasiga asoslanganligi va o'zgaruvchan tok mashinalaridagi fizik jarayonlar ko'p jihatdan transformatordagiga o'xshaganligi uchun ushbu kursda transformatorlar nazariyasi asoslarini o'rganish o'zgaruvchan tok mashinalari nazariyasini yanada chuqurroq tushunib olishga imkon beradi.

Elektr mashinalari quyidagicha tasniflanadi, ya'ni quvvatiga ko'ra: 1) 500 W gacha – elektr mikromashinalari; 2) $0{,}5 < P \leq 10$ kW – kam quvvatli; 3) $10 < P \leq 200$ kW – o'rta quvvatli; 4) quvvati $P > 200$ kW – katta quvvatli;

aylanish chastotasiga ko'ra: a) n = 300 ayl/min. gacha – kam tezlikli; b) $n = 300 \div 1500$ ayl/min – o'rta tezlikli; d) $1500 < n \leq 6000$ ayl/min – katta tezlikli; e) $n > 6000$ ayl/min – o'ta katta tezlikli elektr mashinalari.

Elektr mashinalarida rotor va stator magnit maydonlarining o'zaro qo'zg'almasligi hamda elektr mashinalarining generator va motor rejimlarida ishlash mumkinligi elektr mashinalari nazariyasining *asosiy qoidalaridir.*

Elektr mashinalariga qo'yiladigan umumiy texnik talablar. Umumiy maqsadli elektr mashinalariga qo'yiladigan *asosiy talablar* xalqaro yoki MDH standartlari tomonidan belgilanib, ular quyidagilardan iborat:

1) ishda ishonchliligi yuksak bo'lishi; 2) energetik ko'rsatkichlari yuqori bo'lishi; 3) gabarit o'lchamlari, massasi va narxi imkon qadar minimal bo'lishi; 4) konstruksiyasi ishlab chiqarishda oddiy va ularga texnik xizmat ko'rsatish hamda ishlatishda o'ng'ay bo'lishi zarur.

Har qaysi elektr mashina ekspluatatsiyaning aniq sharoitlarida (yuklamaning rejimi, ruxsat berilgan o'ta yuklama, kuchlanish, o'zgaruvchan tok chastotasi, aylanish chastotasi, sovitish muhitining temperaturasi, dengiz sathidan balandligi, namlik va boshqalarda) ishlashga hisoblangan bo'ladi. Bu sharoitlarda mashina belgilangan (davriy ta'mirlashlar orasidagi) vaqt mobaynida avariyasiz va buzuqliklarsiz nominal quvvatda ishlay olishi zarur.

Mashinaning ishda ishonchliligini ta'minlash maqsadida uni

loyihalashda hisobga olish, ishlab chiqarishda yuksak sifatli texnologiyani qo'llash va ishlatishni to'g'ri tashkil qilish (loyihada belgilangan rejimda ishlatish va profilaktik ta'mirlarni o'z vaqtida bajarish) zarur bo'ladi.

K.2. Elektr mashinalarida energiyaning elektromexanik o'zgartirilishi

Elektr generatorining ishlash prinsipi buyuk ingliz olimi Faradey kashf qilgan (1831-y.) *elektromagnit induksiya qonuniga* asoslangan.

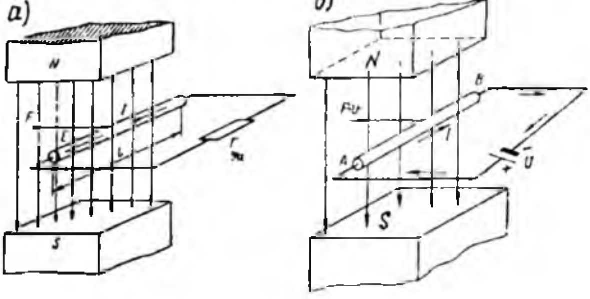
Agar o'tkazgich magnit maydonda tashqi kuch F ta'sirida harakatga keltirilsa (K.2,*a*-rasm), o'tkazgichda EYK hosil bo'ladi. Agar o'tkazgich maydonni perpendikular ravishda kesib o'tsa, hosil bo'lgan EYK ning qiymati quyidagiga teng bo'ladi:

$$E = B \cdot l \cdot v, \qquad (K.1)$$

bunda E – o'tkazgichda hosil bo'lgan EYK, [V]; V – magnit induksiya, [T];

l – o'tkazgichning aktiv, ya'ni magnit maydonini kesib o'tadigan qismining uzunligi, [m]; v – o'tkazgichning harakatlanish tezligi, [m/s].

Bu EYK ning yo'nalishini aniqlashda «o'ng qo'l» qoidasidan (K.3,*a* rasm) foydalaniladi. Buning uchun o'ng qo'lni magnit maydondagi o'tkazgichga parallel qilib tutganda maydon kuch chiziqlari kaftga tomon yo'nalib, bosh barmoq o'tkazgich harakati yo'nalishida ochilsa, qolgan to'rtta barmoqning ochiq holati EYK ning yo'nalishini ko'rsatadi. Tashqi kuch ta'sirida o'tkazgich o'ngdan chapga harakatlantirilganda (K.2,*a*-rasm) EYK biz tomonga yo'nalgan bo'ladi.



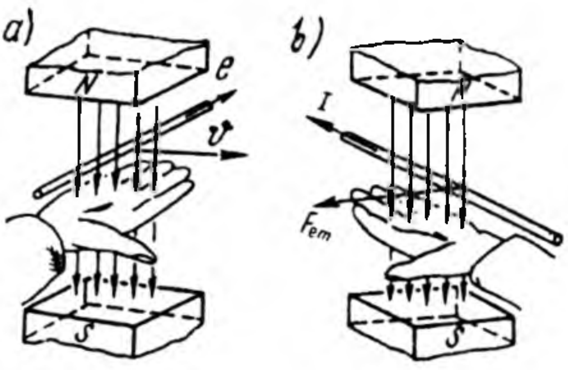
K.2-rasm. *Elektr mashinalarida mexanik energiyaning elektr energiyaga (**a**) va elektr energiyaning mexanik energiyaga (**b**) aylantirilishiga oid chizmalar.*

Agar o'tkazgichning uchlari tashqi qarshilikka ulansa, EYK ta'sirida berk zanjirda yo'nalishi EYK niki bilan bir xil bo'lgan tok paydo bo'ladi. Shunday qilib, magnit maydondagi o'tkazgichni bu holda *eng oddiy generator* deyish mumkin (K.2, *a*-rasm).

O'tkazgichdagi tok I bilan magnit maydonning o'zaro ta'siri natijasida Amper qonuniga binoan o'tkazgichga ta'sir etuvchi elektromagnit kuch F_{em} hosil bo'ladi. Bu kuchning qiymati quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$F_{em} = B \cdot l \cdot I. \qquad (K.2)$$

Bu kuchning yo'nalishini «chap qo'l» qoidasi (K.3,*b*-rasm) yordamida aniqlash mumkin. Buning uchun chap qo'lni magnit maydondagi o'tkazgichga parallel qilib tutganda maydon kuch chiziqlari kaftga tomon yo'nalib, to'rtta barmoq o'tkazgichdagi tokning yo'nalishida ochilsa, o'tkazgichga perpendikular ochilgan bosh barmoq elektromagnit kuchning yo'nalishini ko'rsatadi (K.3,*b*-rasm). Bu kuch o'tkazgichning harakatlanishiga teskari yo'nalgan bo'lib, *generatorda tormozlovchi ta'sir qiladi.*



K.3, b-rasm. «O'ng qo'l» (*a*) va «chap qo'l» (*b*) qoidalariga oid chizmalar

O'tkazgichning harakati bir tekis bo'lganda tashqi harakatlantiruvchi kuch F elektromagnit kuch F_{em} ga teng bo'ladi:

$$F = F_{em}. \qquad (K.3)$$

(K.3) tenglikning ikkala qismini o'tkazgich tezligi **v** ga ko'paytiramiz:

$$F \cdot v = F_{em} \cdot v. \qquad (K.4)$$

(K.2) dan F_{em} ning qiymatini (K.4) ga qo'yib quyidagiga ega bo'lamiz:

$$F \cdot v = B \cdot l \cdot I \cdot v = E \cdot I. \qquad (K.5)$$

(K.5) tenglikning chap qismi (F·v) o'tkazgichni magnit maydonda

harakatlantirish uchun mexanik quvvatni, o'ng qismi (E·I) esa yopiq zanjirda tok I hosil qilgan elektr quvvatni ko'rsatadi. Shunday qilib, *tashqaridan berilayotgan mexanik quvvat generatorda elektr quvvatga aylanadi.*

Agar o'tkazgichga tashqi kuch qo'ymay, unga elektr energiya manbasidan K.2,*b*-rasmda ko'rsatilgandek yo'nalishdagi tok berilsa, u holda o'tkazgichga faqat elektromagnit kuch F_{em} ta'sir etadi, xolos. O'tkazgich shu kuch ta'sirida magnit maydonda o'ngdan chapga harakatlana boshlaydi, o'tkazgichda hosil bo'ladigan EYK esa oldingiga (K.2,*a*-rasm) nisbatan teskari bo'ladi. O'tkazgichga manbadan qo'yilgan kuchlanishning asosiy qismi undagi hosil bo'lgan EYK bilan muvozanatlashadi, juda ham kam qismi esa o'tkazgichdagi kuchlanish tushishini qoplaydi, demak, K.2,*b*-rasmdagi elektr zanjiri uchun Kirxgofning II qonuni quyidagicha yoziladi:

$$U = E + I\,r, \qquad (K.6)$$

bu yerda:

r — o'tkazgichning elektr qarshiligi.

(K.6) tenglikning ikkala qismini tok I ga ko'paytiramiz:

$$U\,I = E\,I + I^2\,r. \qquad (K.7)$$

(K.1) formuladan EYK E ning qiymatini (K.7) ga qo'yib, (K.2) ni ham hisobga olgan holda quyidagini hosil qilamiz:

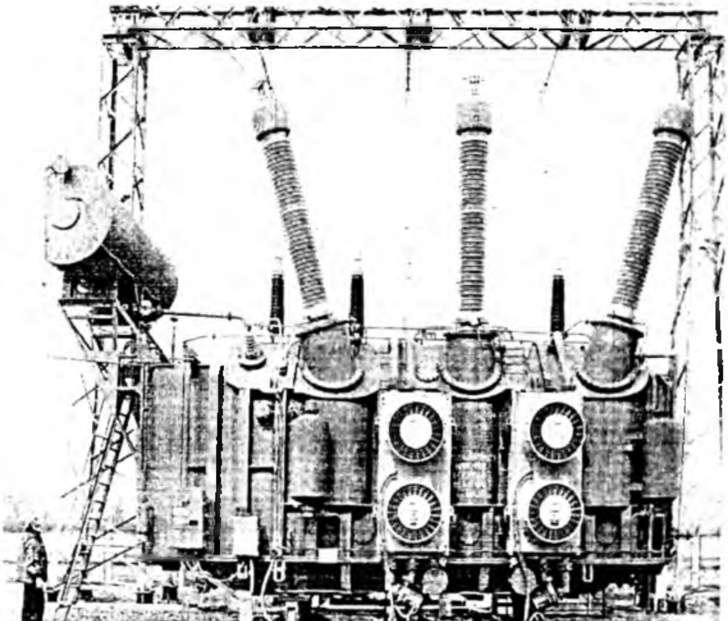
$$U\,I = B\,l\,v \cdot I + I^2\,r = F_{em} \cdot v + I^2\,r. \qquad (K.8)$$

Bundan: o'tkazgichga kiruvchi elektr quvvatning asosiy qismi mexanik quvvat ($F_{em} \cdot v$) ga aylanadi, juda ham kam qismi esa o'tkazgichdagi elektr isroflari ($I^2 r$)ni qoplashga sarflanar ekan. Shunday qilib, magnit maydonga joylashgan tokli o'tkazgichni *eng oddiy elektr motori* deb qarash mumkin.

Elektr mashina ishlashining zaruriy sharti o'tkazgichlar va magnit maydonning mavjud bo'lishidir. Bunda elektr mashina generator sifatida ham, motor sifatida ham ishlashi mumkin. Elektr mashinaning bu xususiyati ularning *qaytarligi* deb ataladi (buni rus olimi E. Lens 1833-y. kashf qilgan).

I BO'LIM.
TRANSFORMATORLAR

Mazkur bo'limda transformatorlarning bajaradigan vazifalari va qo'llanish sohalari; ularga qo'yiladigan talablar; magnit sistemasi va chulg'amlarining tuzilishi; transformatorning nazariyasi; barqaror simmetrik va nosimmetrik rejimlarida hamda o'tish rejimlarida bo'ladigan jarayonlar; transformatorlar chulg'amlari ulanishining guruhlari va parallel ishlashi; rejim va elektr parametrlarini tajriba yo'li bilan aniqlash; ekspluatatsion xarakteristikalari; avtotransformatorlar va uch chulg'amli transformatorlarning o'ziga xos xususiyatlari bayon etilgan.

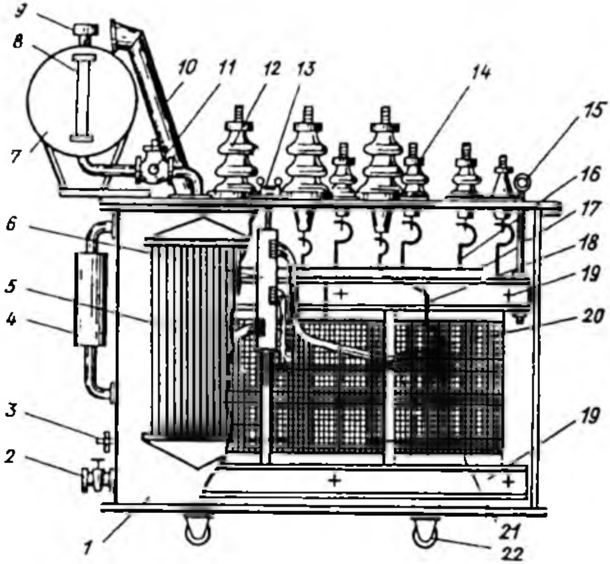


T.1-rasm. *Quvvati 250000 кV·A, kuchlanishi 330 кV, TDC−250000/330 tipli kuchlanishni oshirib beruvchi uch fazali ikki chulg'amli transformator*

1-BOB. TRANSFORMATORLARGA OID UMUMIY MA'LUMOTLAR

1.1. Transformatorlarning elektroenergetikada tutgan o'rni

Elektr stansiyalaridan iste'molchilarga elektr energiyani uzatishdagi energiya isroflari liniya simlaridan o'tadigan tok kuchiga bog'liq bo'ladi. Elektr stansiyalaridagi sinxron generatorlar kuchlanishining kattaliklari ($U \leq 24$ kV) uzoq masofada joylashgan iste'molchilarga elektr energiyani



1.1-rasm. *Kuchlanish klassi 35 kV quvvati 1000÷6300 kV·A konstruksiyasiga mos keladigan pasaytiruvchi kuch transformatori:*

***1** — bak; **2** — moy uchun ventil; **3** — zaminlash uchun qistirma; **4** — termosifonli filtr; **5** — radiator; **6** — kuchlanishni rostlash qayta ulagichi; **7** — kengaytirgich; **8** — moy ko'rsatkich; **9** — havo quritgich; **10** — chiqaruvchi (saqlovchi) truba; **11** — gaz rele; **12** — YK chulg'am uchun o'tish izolatori; **13** — qayta ulagich dastagi; **14** — PK chulg'amga oid o'tish izolatori; **15** — transformatorni ko'tarish uchun ilgich; **16** — PK chulg'amni o'tish izolatori bilan bog'lovchi o'tkazgich; **17** — magnit o'tkazgich; **18** — YK chulg'amni o'tish izolatori bilan bog'lovchi o'tkazgich; **19** — yuqorgi va pastki yarmo balkalari; **20** — YK chulg'am rostlash tarmog'ining simlari; **21** — YK chulg'am; **22** — aravacha g'ildiragi.*

tejamli uzatish uchun ancha kamlik qiladi. Elektr energiyaning ma'lum quvvati ($S=\sqrt{3}\,U\cdot I$)ni iste'molchiga uzatishda transformator yordamida kuchlanish U qanchaga oshirilsa, tok kuchi I shuncha marta kamayadi. *Bunda*: 1) liniya uchun ko'ndalang kesim yuzasi nisbatan kichik bo'lgan sim tanlanib, elektr uzatish liniyasini qurishda rangli metallar tejaladi; 2) liniyadagi quvvat isroflari ($P'=3I^2\,R_l$) kamayishi tufayli iste'molchilarga yetkazib beriladigan aktiv quvvat oshadi.

Ayrim issiqlik elektr stansiya (IES)larida o'rnatilgan kuch transformatorlari uzatilayotgan elektr energiyaning kuchlanishini 20 kV dan 500 kV ga, ya'ni 25 marta oshirib beradi. Natijada, liniya simlaridagi energiya isroflari transformatorsiz uzatilganiga nisbatan $25^2 = 625$ marta kamayadi, ya'ni katta iqtisodiy samaraga erishiladi.

Har qaysi elektr stansiyasida kuchlanishni oshiruvchi katta quvvatli transformatorlar o'rnatilgan bo'ladi (T.1-rasm). Elektr uzatish liniyasi uzoq masofali va uzatilayotgan quvvat qancha katta bo'lsa, texnik-iqtisodiy jihatdan asoslangan kuchlanish shuncha yuqori bo'ladi. ***Masalan,*** 103 MW quvvatni 1000 km masofaga uzatish uchun deyarli 500 kV kuchlanish zarur bo'ladi.

O'zgaruvchan tok iste'molchilarining ko'pchiligi 220, 380 va 660 V kuchlanishlarda, nasos stansiyalarda o'rnatilgan suv nasoslarini yuritadigan sinxron elektr motorlari 10 kV; metallurgiyada qo'llaniladigan katta quvvatli faza rotorli asinxron elektr motorlari 6 kV, shu sohada ishlatiladigan yirik sinxron elektr motorlari esa 6 va 10 kV kuchlanishlarda; elektrlashtirilgan temiryo'l transportida qo'llaniladigan elektr motorlari 3,3 kV kuchlanishda ishlaydi. Shuning uchun elektr uzatish liniyasining yuqori kuchlanishi markaziy va mintaqaviy podstansiyalarda hamda elektr energiya iste'molchilariga yaqin joyda o'rnatilgan kuch transformatorlari orqali ular uchun zarur bo'lgan kuchlanish qiymatiga qadar pasaytiriladi. Shu xususda 1.1-rasmda, kuchlanish klassi 35 kV, quvvati esa 1000÷ 6300 kV·A konstruksiyasiga mos keladigan pasaytiruvchi kuch transformatori ko'rsatilgan.

Elektr stansiyasidan iste'molchilarga elektr energiyani uzatish jarayoni besh-olti bosqichda, asosan ikki chulg'amli katta quvvatli transformatorlar vositasida amalga oshiriladi. Shuning uchun kuch transformatorlarining soni hamda ularning quvvati elektr energiyani uzatish masofasiga qarab elektr stansiyalaridagi elektr generatorlarining soni va o'rnatilgan quvvatiga nisbatan taxminan olti marta ko'p bo'ladi.

O'zbekiston Respublikasida kuch transformatorlari hamda maxsus transformatorlarning ayrimlari asosan Toshkent viloyatida faoliyat ko'rsatayotgan Chirchiq transformatorsozlik zavodida, «ELUS» (Elektr uskunalari) va «Osiyoelektroenergiya» ilmiy-ishlab chiqarish korxonalarida ishlab chiqarilmoqda. Toshkent shahrida kuch transformatorlarini ta'mirlaydigan korxonalardan «Energota'mir» ixtisoslashtirilgan ta'mirlash-ishlab chiqarish va «Rotor» ta'mirlash korxonalari ham faoliyat ko'rsatmoqda.

1.2. Transformatorlarning tasnifi, ularga qo'yiladigan asosiy talablar, gabaritlari va nominal kattaliklari

Transformatorlarning tasnifi. Bajaradigan vazifasiga ko'ra transformatorlar quyidagi turlarga bo'linadi: 1) *kuch transformatorlari*; 2) *maxsus transformatorlar*. Kuch transformatorlari o'z navbatida: *umumiy maqsadli* va *sohaviy* turlarga bo'linadi.

Elektr energiyani uzatish, qabul qilish hamda ishlatishga mo'ljallangan elektr tarmoqlari va uskunalarida elektr energiyani o'zgartirish (kuchlanishni oshirish yoki kamaytirish) vazifasini bajaradigan transformatorni ***kuch transformatori*** deyiladi. Bu toifaga: quvvati 6,3 kV·A va undan katta bo'lgan *uch fazali* transformatorlar hamda quvvati 5 kV·A va undan katta bo'lgan *bir fazali* transformatorlar kiradi.

Normal sharoitda ishlayotgan elektr tarmog'iga ulash uchun, yoxud maxsus ish sharoiti, yuklamaning xarakteri yoki ish rejimi bilan farq qilmaydigan energiya iste'molchilarini bevosita ta'minlashga tayyorlangan transformatorlarni ***umumiy maqsadli kuch transformatorlari*** deyiladi. Transformatorlar *fazalar soniga ko'ra*: bir, uch va ko'p fazali (sohaviy); *chulg'amlar soniga ko'ra* – ikki, uch va ko'p chulg'amli turlarga bo'linadi.

Agar transformatorning har fazasida uchta [yuqori kuchlanishli (YK), o'rta kuchlanishli (O'K) va past kuchlanishli (PK)] elektr jihatdan ulanmagan chulg'amlari bo'lsa, bunday holda ***uch chulg'amli*** transformator deyiladi.

Agar transformatorda $U_{1N} < U_{2N}$ bo'lsa ***oshiruvchi***, $U_{1N} > U_{2N}$ bo'lganida esa – ***pasaytiruvchi*** transformator deyiladi.

Elektr energiyani transformatorning qaysi chulg'amiga berilishiga qarab transformatorni oshiruvchi yoki pasaytiruvchi sifatida foydalanish mumkinligi uning *qaytarlik xossasidir*.

Nominal quvvati va kuchlanishlariga bog'liq ravishda kuch transformatorlari va avtotransformatorlarining gabaritlarga ajratilishi 1.1-jadvalda ko'rsatilgan.

Kuch transformatorlariga qo'yiladigan asosiy talablar. Elektrotexnika sanoatida ishlab chiqarilayotgan kuch transformatorlari ishonchlilik, tejamlilik, chidamlilik va boshqa muhim jihatlari bilan *jahon bozorida yuksak raqobatbardosh bo'lishi zarur*. Shu sababli mazkur transformatorlarga *quyidagi asosiy talablar qo'yiladi*: a) ishlab chiqarishda va ishlatishda tejamli bo'lishi; b) ishlatishda ishonchliligi; d) isroflar standartda belgilangan me'yordan oshmasligi; e) parallel ulash shartlarini qanoatlantirishi; f) me'yordan ortiqcha qizib ketmasligi; g) kuchlanishni rostlashga imkon berishi; h) transformatorni ishlatish jarayonida ayrim sabablarga ko'ra sodir bo'ladigan qisqa muddatli o'ta kuchlanishlarga va kam muddatli qisqa tutashuvdagi ancha katta bo'lgan toklar ta'siriga bardosh berishi zarur.

1.1-jadval

Kuch transformatorlari va avtotransformatorlarining gabaritlari

Gabarit raqamlari	**Kuch transformatorlari va avtotransformatorlarining standartda belgilangan qatorga mos keluvchi quvvat va kuchlanishlari**	
	Nominal quvvati (S_N), kV·A	*Nominal kuchlanishi* (U_N), kV
I	$S_N < 100$	$U_N \le 35$
II	$100 \le S_N < 1000$	$U_N \le 35$
III	$1000 \le S_N < 6300$	$U_N \le 35$
IV	$S_N \ge 6300$	$U_N \le 35$
V	$S_N < 32\ 000$	$U_N \le 110$
VI	$32\ 000 \le S_N < 80\ 000$	$U_N \le 330$
VII	$80\ 000 \le S_N < 200\ 000$	$U_N \le 330$
VIII	$S_N \ge 200\ 000$	$U_N \ge 330$

Transformatorning nominal kattaliklari. Transformatorlar standart talablariga mos holda texnik shartlar bo'yicha tayyorlanadi va elektr

energiyani o‘zgartirish bo‘yicha ma’lum vazifalarni bajarish uchun belgilanadi. Bu sharoitlardagi transformatorning ishi nominal kattaliklar bilan xarakterlanadi va ular elektr jihozlari kataloglarida hamda transformatorga mahkamlangan pasport taxtachada quyidagilar ko‘rsatilgan bo‘ladi:

Transformatorning to‘la nominal quvvati V·A yoki kV·A da ko‘rsatiladi:

***a*)** bir fazali ikki chulg‘amli uchun – $S_{1N} = U_{1N} I_{1N}$;

***b*)** uch fazali ikki chulg‘amli uchun – $S_{1N} \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} = 3U_{1Nf} I_{1Nf}$.

Transformatorlarda FIK juda ham katta bo‘lganligidan ikki chulg‘amli transformatorda birlamchi (S_{1N}) va ikkilamchi (S_{2N}) chulg‘am nominal quvvatlari taxminan bir xil bo‘ladi, ya’ni $S_{1N} \approx S_{2N}$.

Nominal kuchlanish deganda har bitta chulg‘amning liniya kuchlanishi tushuniladi. Ikkilamchi chulg‘amning nominal kuchlanishi uchun $U_{2N} = U_{2(0)}$ qabul qilinadi. Transformatorning nominal toklari deganda quvvati $S_1 = S_2 = S_N$ va kuchlanishlari (U_{1N} va U_{2N}) bo‘yicha hisoblangan 1- va 2-chulg‘amlarning liniya qiymatlari tushuniladi. *Bulardan tashqari*: ***1***) nominal chastota f_N; ***2***) fazalar soni *m*; 3) chulg‘amlarning ulanish sxemasi va guruhi; ***4***) qisqa tutashuv kuchlanishi $u_{qt(\%)}$; ***5***) transformatorning tipi; ***6***) standart nomeri; 7) sovitish usuli va boshqa ayrim ma’lumotlar keltiriladi.

Nazorat savollari:

1. *Transformatorning ahamiyati nimadan iborat?*
2. *Transformatorlar qanday belgilariga binoan tasniflanadi?*
3. *Kuch transformatorlariga qanday asosiy talablar qo‘yiladi?*

2-BOB. TRANSFORMATORLARNING MAGNIT SISTEMALARI VA CHULG'AMLARI

2.1. Transformatorlarning magnit o'tkazgichlari va ularning konstruksiyasi

Magnit o'tkazgich transformatorning muhim tarkibiy qismi bo'lib, u chulg'amlararo magnit bog'lanishni kuchaytirishdan tashqari, chulg'amlari va yordamchi qismlarini o'rnatish hamda mahkamlash uchun konstruktiv asosdir.

O'zgaruvchan tokda (f = 50 Hz) uyurma toklar tufayli hosil bo'ladigan energiya isroflarini kamaytirish maqsadida transformatorlarning magnit o'tkazgichlari 0,35 va 0,30 mm qalinliklardagi sovuq holatda jo'valangan anizotropli (magnit xossalari yaxshilangan, masalan, 3404÷3406 markali) elektrotexnik po'lat plastinalari maxsus lok va oksid pardalari bilan qoplangan holda izolatsiya qilinib yig'iladi. Bunday po'latni qo'llash magnit o'tkazgichdagi induksiyani 1,6÷1,65 T gacha oshirishga (issiq holatda jo'valangan po'latda esa magnit induksiyani 1,4÷ -1,45 T dan oshirib bo'lmas edi) imkon yaratib, transformatorning aktiv (magnit va elektr o'tkazuvchi) materiallari massasini hamda energiya isroflarini keskin kamaytirishga imkon berdi.

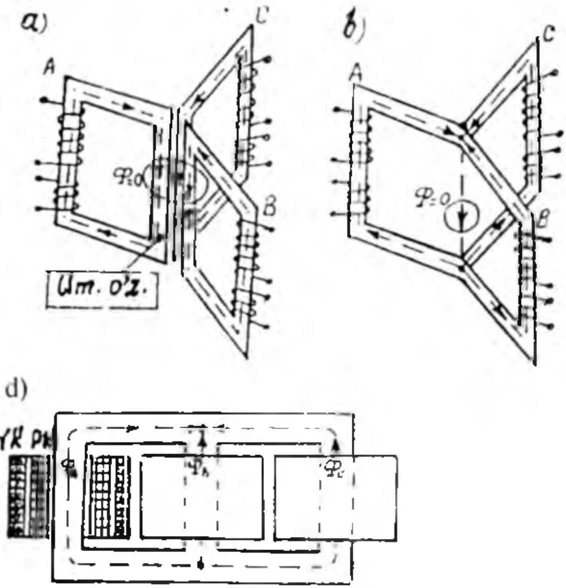
Magnit sistemaning chulg'am joylashtirilgan qismini «sterjen», ularni ulab, berk magnit zanjir hosil qiladigan qismini «yarmo» deyiladi.

Uch fazali transformatorlarning magnit o'tkazgichlari.

Uch fazali tok va kuchlanishlarni *magnit o'tkazgichi umumiy bo'lgan bitta uch sterjenli uch fazali* transformator vositasida o'zgartiriladi. Agar uchta bir fazali transformatorni 2.1,*a*-rasmda ko'rsatilgandek joylashtirilsa, unda magnit o'tkazgichning o'zaklarini konstruktiv jihatdan bitta umumiy o'zakka almashtirish mumkin. Uch fazali sistemada sinusoidal magnit oqimlar oniy qiymatlarining yig'indisi nolga teng bo'lganligidan umumiy o'zakda magnit oqimi bo'lmaydi, shuning uchun bu o'zakka zarurat ham qolmaydi.

Mazkur konstruksiyani soddalashtirish uchun uchta sterjenni bitta tekislikka joylashtirib, ustki va ostki yarmolar bilan ulansa, uch fazali uchta sterjenli yassi shaklli magnit o'tkazgich hosil bo'ladi (2.1,d-rasm).

Barcha o'zak va yarmolarning bo'ylama o'qlari bitta tekislikda joylashgan bo'lsa, transformator magnit o'tkazgichini *yassi shaklli* (2.1,d-rasm), agar har xil tekisliklarda joylashgan bo'lsa — *fazaviy*

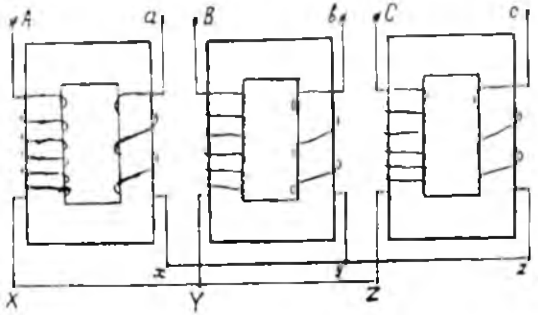


2.1-rasm. *Magnit sistemasi umumiy bo'lgan uch fazali transformator konstruksiyasining hosil qilinishiga oid chizmalar:*
a *— uchta bir xil bir fazali transformatorlarning joylashtirilishi (bunda* ***Um. o'z*** *— umumiy o'zak);* ***b*** *— uch fazali simmetrik transformatorning fazoviy konstruksiyasi;* ***d*** *— fazoviy konstruksiyani o'zgartirib hosil qilingan yassi shakldagi magnit o'tkazgichli uch fazali transformator.*

shaklli deyiladi (2.1.b va 2.3-rasmlar). O'zaklarning yarmolar bilan birikishiga ko'ra magnit sistemalar *sterjenli, zirh-sterjenli* va *zirhli* turlarga bo'linadi.

Amaliyot uchun muhim ma'lumot. Bitta uch fazali transformatorni tayyorlash va ishlatish uchun o'rnatish, xuddi shunday ishlarni uch fazali transformator quvvatiga teng keladigan uchta bir fazali kuch transformatorlari uchun ketadigan *xarajatning kam bo'lganligi* va uch fazali transformatorning massasi uchta bir fazali transformatorlar massasining yig'indisidan 30÷35 foiz kamligi hamda uch fazali transformator ishda va unga xizmat ko'rsatishda iqtisodiy jihatdan samarali bo'lganligi sababli yassi shakldagi magnit o'tkazgichli uch fazali «sterjenli» kuch transformatorlari amalda keng qo'llaniladi.

Magnit sistemasi uchta faza uchun umumiy bo'lgan kuch transformatorlari massasining yoki tashqi o'lchamlarining haddan tashqari kattaligi tufayli temiryo'lda tashish va ishlatish uchun o'rnatishda texnik imkoniyatlar chegaralangan bo'lgani uchun energetika sistemasida *guruhlangan transformator* ham ishlatiladi (2.2-rasm).



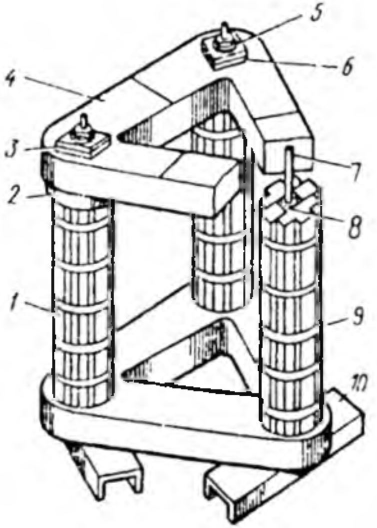
2.2-rasm. *Bir fazali transformatorlarning uch fazali guruhi yoki guruhlangan transformator.*

O'zaklarni yarmolar bilan birlashish usuliga ko'ra magnit o'tkazgichlar tutashgan va taxlangan turlarga bo'linadi.

Tutashgan magnit o'tkazgichda o'zaklar va yarmolar alohida-alohida yig'ilib, so'ngra o'zaro bir butun qilib tutashtiriladi.

Taxlangan magnit o'tkazgichda o'zak va yarmo plastinalarini yig'ishda tutashgan magnit o'tkazgichiga nisbatan nomagnit havo oraliqlarining ancha kamligi natijasida *salt ishlash tokining keskin kamayishi uning afzalligidir.*

Amalda *fazaviy* shaklli magnit sistemalari ham qo'llanilmoqda (2.3-rasm). Bunday magnit sistemaning yarmosidagi magnit oqim $F_{ya} = F_{o'z}/\sqrt{3}$ bo'lganligidan uning ko'ndalang kesim yuzasini o'zaknikiga nisbatan $\sqrt{3}$ marta kamaytirish mumkinligi tejamli hisoblanadi. Chulg'amni o'rash texnologik jarayonining murakkabligidan bu magnit sistemani qo'llash quvvati 630 kV·A gacha bo'lgan kuch transformatorlari bilan cheklangandir.



2.3-rasm. *Transformator (TM–250/6) ning fazaviy shaklli magnit o'tkazgichi: **1** – sterjen, **2** va **6** – izolatsiyalovchi qistirmalar; **3** – Uch fazali platrstina; **4** – yarmo; **5** – prujina; **7** – shpilka; **8** – izolatsiyalovchi trubka; **9** – siquvchi kamar; **10** – asos tayanch.*

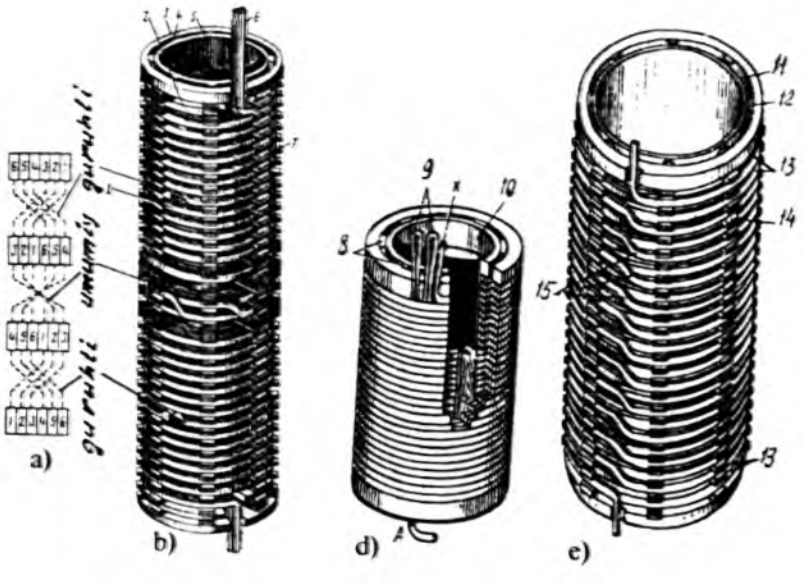
2.2. Transformatorlarning chulg'amlari va ularning konstruksiyasi

Chulg'amlar transformatorning muhim tarkibiy qismi bo'lib, ular elektr energiyani o'zgartirish uchun zarur bo'lgan magnit maydonni vujudga keltirishni hamda transformatorni amalda ishlatish uchun muhim bo'lgan EYK lar hosil qilishni ta'minlaydi.

Chulg'amlarni tayyorlashdagi sarflanadigan materiallar narxi va ularni o'rash uchun to'lanadigan ish haqi transformator narxining taxminan 50 foizini tashkil etadi. Transformatorning xizmat muddati uning og'ir sharoitlarda ishlaydigan chulg'amlarining xizmat muddati bilan aniqlanadi.

O'zakda joylashishiga ko'ra chulg'amlar *konsentrik* va *almashinuvchi* turlarga bo'linadi. *Almashinuvchi* chulg'amlarda YK va PK g'altaklar o'zak balandligi bo'yicha navbatma-navbat o'zaro almashingan bo'ladi.

Almashinuvchi chulg'amlar asosan maxsus transformatorlar uchun qo'llaniladi. Umumiy maqsadli kuch transformatorlarida va maxsus transformatorlarning ayrimlarida, odatda, *konsentrik* chulg'amlar qo'llaniladi. Bunda o'zak yaqiniga PK chulg'am, uning tashqarisiga esa YK chulg'am joylashtiriladi. *Konstruksiyasi va o'rash usuliga ko'ra* konsentrik chulg'amlar *silindrik, g'altakli va vintsimon* turlarga bo'linadi.



2.4-rasm. *Kuch transformatorining: a — vintsimon chulg'amida simlarning o'rin almashinish (transpozitsiya) sxemasi; b — bir yo'lli vintsimon chulg'am: (1 — o'ramlar; 2 — tenglashtiruvchi segmentlar; 3 — ustki tayanch halqasi; 4 — vertikal sovitish kanallari; 5 — izolatsion silindr; 6 — parallel simlar; 7 — qistirma); d — ko'p qatlamli silindrik chulg'am: (8 — vertikal reykalar; 9 — chulg'am uchlari; 10 — izolatsion silindr); e — 35 kV kuchlanish uchun uzluksiz g'altakli chulg'am: (11 — izolatsion silindr; 12 — vertikal reykalar; 13 — chulg'amning kuchaytirilgan izolatsiyali g'altaklari; 14 — qistirma; 15 — simlarning o'rnini almashtirish uchun o'tishlar).*

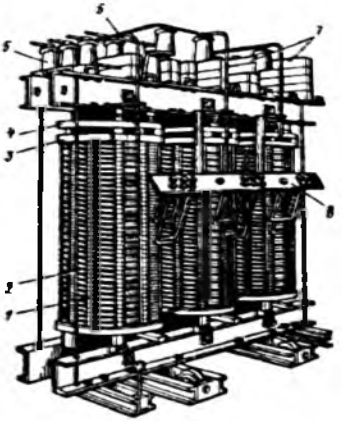
Katta quvvatli transformatorlarda parallel simlarning soni bir necha o'nlargacha yetishi mumkin. Shu sababli bunday transformatorlarning **PK** chulg'ami uchun bir necha to'g'riburchak kesimli simlardan parallel bajarilgan *ko'p yo'lli vintsimon chulg'amlar* qo'llaniladi. Vintsimon chulg'amda (2.4,*b*-rasm) parallel simlar konsentrik ravishda chulg'am o'qidan har xil uzoqlikda joylashganligi tufayli o'zakka yaqinroq joylashgan simlarga nisbatan undan uzoqda joylashganlari uzunroq bo'ladi. Bu farq shu simlar aktiv va induktiv qarshiliklarining tengsizligini vujudga keltiradi va ularda toklar bir tekis taqsimlanmaydi.

Vinsimon chulg'amlarda parallel simlardagi tokning bir tekis taqsimlanishi uchun bir o'ramni hosil qiluvchi simlarni ma'lum sxemada o'rin almashtirib (transpozitsiya qilib) joylash talab qilinadi (2.4,*a*-rasm). Bunda har bitta sim bitta o'ram chegarasida mumkin bo'lgan hamma holatlarni navbatma-navbat egallashi lozim bo'ladi.

Quvvati $S_N \leq 630$ kV·A va kuchlanishi $U_N \leq 35$ kV gacha bo'lgan transformatorlarda PK chulg'am uchun dumaloq kesimli simdan yasalgan *ko'p qatlamli silindrik chulg'amlar* qo'llaniladi (2.4,d-rasm).

Uzluksiz g'altakli chulg'amda bitta g'altakdan ikkinchisiga simni uzmasdan o'tiladi (2.4,*e*-rasm). Bunday chulg'amning *afzalliklariga* tayanch yuzasining kattaligi sababli qisqa tutashuvda vujudga keladigan bo'ylama kuchlarga nisbatan katta chidamlilik va sovitish yuzasining kattaligi kiradi. Shu afzalliklari tufayli *uzluksiz chulg'am* keng ko'lamda qo'llaniladi.

Transformator chulg'amlarining uchlari bak qopqog'ida o'rnatilgan maxsus chinni izolatorlar ichidan o'tgan kesim yuzasi nisbatan katta bo'lgan o'tkazgichlarga ulanib tashqariga chiqariladi.



2.5-rasm. *Quvvati 320 kV·A bo'lgan quruq kuch transformatorining qoplamasiz ko'rinishi: [1 — vertikal tortish shpilkasi; 2 — yuqori kuchlanishli chulg'am; 3 — chulg'amlarni presslash uchun chinni taglik; 4 — presslovchi po'lat halqa; 5 — YK ulagichlarning tayanch izolatorlari; 6 — YK ulagichlar; 7 — PK ulagichlarni mahkamlash uchun chinni taglik; 8 — YK klemma (qisqich)lar taxtasi].*

Moy bilan sovitiladigan («moyli») va havo bilan tabiiy ravishda sovitiladigan («quruq») transformatorlarning chulg'amlari A (105 °C) qizishga chidamlilik klassidagi kabel qog'ozi tasmasi bilan izolatsiyalangan PB markali mis va APB markali aluminiy o'rov simlaridan hamda mis va aluminiy tasmasidan yoki o'lchami chulg'am balandligiga teng bo'lgan folgadan tayyorlanadi. Quruq

transformatorlarda (2.5-rasm) «V» va «F» klasslariga kiruvchi izolatsiyali o'rov simlarini ham keng qo'llaydilar.

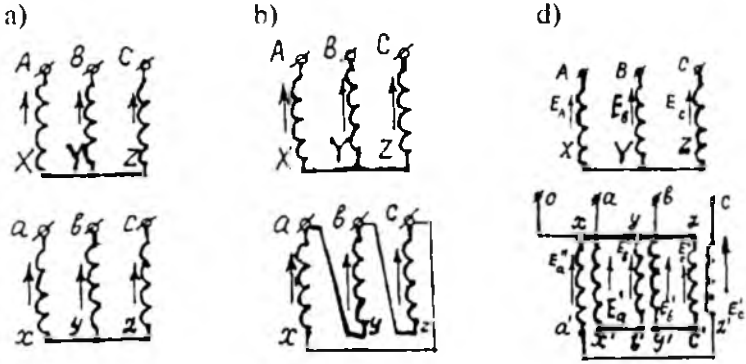
Chulg'amlarning yo'l qo'yiladigan (me'yoriy) temperaturasi transformator moyining temperaturasi (105 °C) bilan, ya'ni «A» klassidagi izolatsiya bilan belgilanganligi sababli, bundan katta temperaturaga mo'ljallab tayyorlangan izolatsion material moyli transformatorlarda qo'llanilmaydi.

Zamonaviy transformatorsozlikda kuchlanish klasslari 110÷1200 kV bo'lgan so'nggi yillarda ishlab chiqilgan transformatorlarda YK chulg'am uchun *to'qima chulg'amlar* keng qo'llanila boshlandi.

To'qima chulg'amda qo'shni o'ramlar orasidagi kuchlanishlar farqi uzluksiz chulg'amnikiga nisbatan n/2 marta katta. Bunda qo'shni g'altaklar orasidagi kuchlanish pasayadi, bu holda ekranlovchi o'ramlar va ayrim g'altaklarni qo'shimcha izolatsiya qilish talab qilinmaydi.

2.3. Transformator va avtotransformator chulg'amlarining ulanish usullari, chulg'am uchlarining standart bo'yicha yangicha belgilanishi va uni tajribada tekshirish

Uch fazali transformator chulg'amlarining ulanish usullari. Umumiy maqsadli uch fazali transformatorlarning chulg'amlari asosan «yulduz» (Y) (2.6, *a*-rasm) va «uchburchak» (Δ) (2.6,b-rasm), ayrimlari esa «zigzag» (Z) (2.6,c-rasm) usulida ulanadi.



2.6-rasm. *Uch fazali transformatorlar chulg'amlarining ulanish usullari: a – yulduz–yulduz (Y/Y); b – yulduz–uchburchak (Y/Δ); d – yulduz–zigzag (Y/Z).*

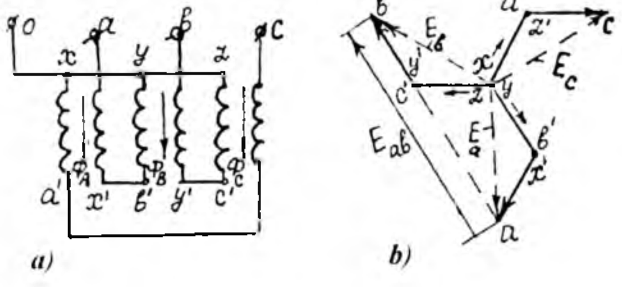
Chulg'amlar Y usulida ulanganda, liniya kuchlanishi $U = \sqrt{3}\ U_f$, liniya toki esa $I = I_f$ bo'ladi. *Bu nisbatlar simmetrik rejim uchun to'g'ridir.*

Odatda, uch fazali *ikki chulg'amli* transformatorning YK chulg'ami ulanish usulining shartli belgisi kasr suratida, PK chulg'aminiki esa kasr maxrajida ko'rsatiladi (masalan, Y/Y, Y/Δ, Y/Z). Uch fazali *uch chulg'amli* transformatorlarda chulg'amlarning sxemalari *YK / O'K / PK* ketma-ketlikda, ya'ni Y/Y/Δ yoki Y/Δ/Δ ko'rinishda belgilanadi.

Zigzag usulida ulangan ikkilamchi chulg'am ikkita teng qismga ajratilib, magnit o'tkazgichning har xil sterjenlariga joylanadi va ular o'zaro qarshi ulanadi. Bu holda fazaviy chulg'am g'altaklarining EYK vektorlarini geometrik ayirish natijasida hosil bo'ladigan fazaviy EYK, shu fazani hosil qiluvchi har qaysi g'altak EYK dan $\sqrt{3}$ marta katta bo'ladi (2.7.*b*-rasm).

Bu g'altaklar mos ulanganida esa, fazaviy chulg'am g'altaklarining EYK lari geometrik qo'shilib, natijaviy EYK kam bo'lishidan amalda g'altaklarni teskari ulaydilar.

Teskari ulangan g'altaklardagi natijaviy EYK normal fazaviy chulg'amning EYK ($E_f = 2\ E'_f$)ga nisbatan $2/\sqrt{3} = 1{,}15$ marta kichik bo'lishidan (E'_f – bitta g'altakning EYK) chulg'am «Z» sxemasiga ulanganda zaruriy EYK E_f ni olish uchun o'rov simi 15 % ko'p sarflanadi. *Bu esa uning kamchiligidir.*



2.7-rasm. *Transformatorning PK chulg'am g'altaklari o'zaro qarshi ulangan «zigzag» ulanishining amaliy sxemasi (a) va unga oid EYK lar vektor diagrammasi (b).*

PK chulg'ami «Z» sxemasiga ulangan transformator *quyidagi ijobiy xususiyatlarga* ega bo'ladi:

1) nosimmetrik yuklamada kuchlanishning vaqt bo'yicha o'zgarish shakli transformator salt ishlagandagi PK chulg'am kuchlanish shakliga yaqin bo'ladi, demak, fazaviy kuchlanishlar shakli deyarli o'zgarmaydi;

2) teng yelkali zigzagda PK chulg'amdan 1: $\sqrt{3}$:3 nisbatdagi uchta kuchlanish olish mumkin. Masalan, fazaviy chulg'amining yarmida (bitta yelkada) – U'_f = 127 V, bitta fazaviy chulg'amda – $\underline{U}_f = \underline{U}'_f + \underline{U}''_f$ =220 V (bunda $\underline{U}''_f$ – PK chulg'amning boshqa faza ta'siridagi ikkinchi yelka kuchlanishi) va fazalararo (liniyaviy) kuchlanish esa $U = \sqrt{3}\,U_f$ = 380 V bo'ladi.

PK chulg'ami «Z» sxemasiga moslab tayyorlangan uch fazali kuch transformatorlari amaliyotda nosimmetrik yuklamaning ta'siri kuchli bo'lgan sohalarda (masalan, to'g'rilagich qurilmalarida va b.) *fazaviy kuchlanishlar shaklining deyarli o'zgarmasligi katta samaradir*.

Fazaviy chulg'am uchlarining belgilanishi. Ilgarigi standart tavsiyasi bilan *bir fazali ikki chulg'amli* transformatorda: YK chulg'amning bosh va oxirgi uchlari tegishlicha – «**A**» va «**X**», PK chulg'amniki esa «***a***» va «***x***» *lotin harflari* bilan belgilangan; *bir fazali uch chulg'amli* transformatorda esa o'rta kuchlanishli (O'K) chulg'amning bosh va oxirgi uchlari tegishlicha – $\mathbf{A}_m$ va $\mathbf{X}_m$ indeksli harflari bilan belgilangan.

Uch fazali ikki chulg'amli transformatorda: YK faza chulg'amlarining bosh va oxirgi uchlari tegishlicha – «A», «B», «C» va «X», «Y», «Z»; PK faza chulg'amlarining bosh va oxirgi uchlari – «*a*», «*b*», «c» va «x», «y», «z» harflari bilan belgilangan.

Uch fazali uch chulg'amli transformatorning O'K faza chulg'amlarining bosh uchlari – «A_m», «B_m», «C_m» va oxirgi uchlari tegishlicha – «X_m», «Y_m», «Z_m» harflari bilan belgilangan. Agar «yulduz» ulanish sxemasida neytral nuqtadan ulagich chiqarilgan bo'lsa, yuqori va past kuchlanishlarda «0», o'rta kuchlanishda esa – «0_m». Bunda chulg'am ulanish sxemasining harflar orqali belgilanishiga «N» indeksi (Y_N) qo'yilgan.

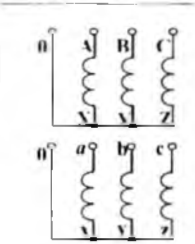
Transformator chulg'amlari uchlarining yangicha belgilanishi. GOST 11677–85 va unga kiritilgan №№ 1, 2, 3, 4 o'zgartirishlar bo'yicha transformator va avtotransformator chulg'amlari uchlarining ilgarigi belgilanishi o'rniga Xalqaro elektrotexnik komissiya talablarini qanoatlantiradigan *yangicha belgilanish* qabul qilingan. Bunga oid

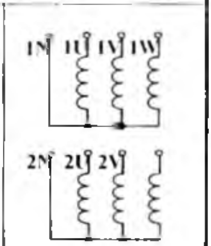
2.1-jadval

Transformator chulg'amlari uchlarining belgilanishiga oid namunalar (GOST 11677−85 va unga kiritilgan № № 1, 2, 3, 4 o'zgartirishlar asosida)

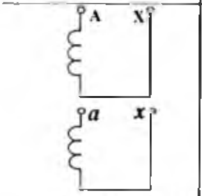
01.01.1987-y gacha ishlab chiqarilgan (*Ilgarigi*)	01.01.1987-y dan keyin ishlab chiqarilgan (*Yangi*)	*Ilgarigi* belgilanishi	*Yangi* belgilanishi

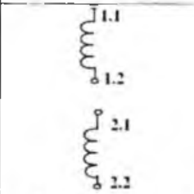
1) Uch fazali ikki chulg'amli



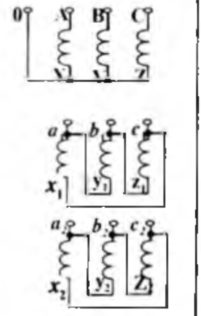


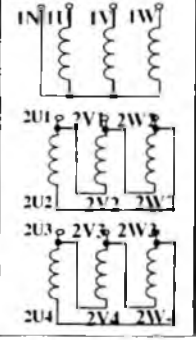
2) Bir fazali ikki chulg'amli



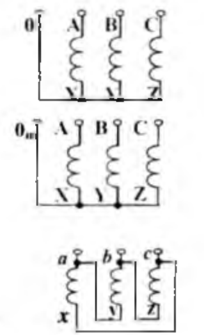


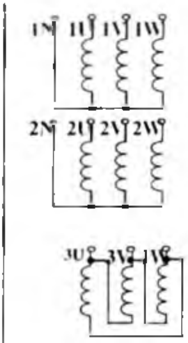
Uch fazali PK chulg'ami teng ikkiga bo'lingan ($U_{PK1} = U_{PK2}$)



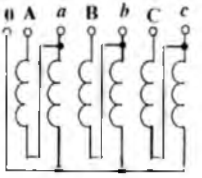


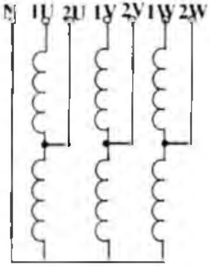
3) Uch fazali uch chulg'amli





4) Uch fazali ikki chulg'amli avtotransformator





namunalar 2.1-jadvalda *ilgarigi* va *yangi* belgilanishlar solishtirilgan ko'rinishda keltirilgan.

Fazaviy chulg'amning o'ralish yo'nalishini aniqlash. Transformator fazaviy chulg'amlarining o'ralish yo'nalishini aniqlash va ularning uchlarini belgilash amaliyot uchun katta ahamiyatga egadir.

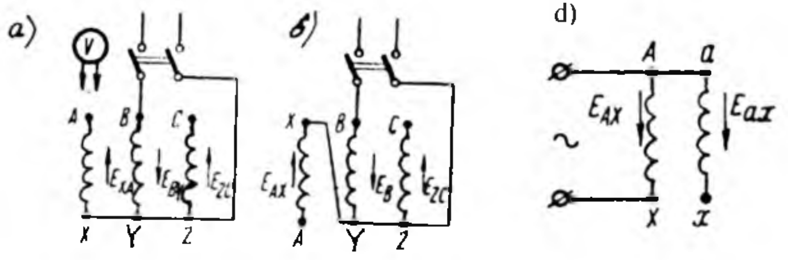
Amaliyot uchun tavsiyalar. O'ralish yo'nalishini aniqlashda fazaviy chulg'amni oddiy g'altak deb qaraladi. G'altaklar o'ng va chap yo'nalishlarda o'ralishi mumkin.

Transformator fazaviy chulg'amlarining *o'ralish yo'nalishini to'g'ri tanlash* bir fazali kuch transformatorlarining har xil o'zaklarida joylashgan chulg'am qismlarini to'g'ri ulashda va uch fazali transformator chulg'amlarining berilgan ulanish guruhini olishda *muhim ahamiyatga* ega bo'ladi.

G'altak uchlarining belgilanishini o'zaro almashtirish uning o'ralish yo'nalishini teskariga o'zgartirish bilan bir xildir.

Chulg'am uchlarining belgilanishini tajribada tekshirish. Transformator chulg'amlarining ulanish guruhini aniqlashda fazaviy chulg'am uchlari belgilanishini tekshirish muhim ahamiyatga egadir.

Buni aniqlash uchun dastlab YK chulg'amni «yulduz» sxemasi bo'yicha ulab (2.8,*a*-rasm), BY fazaviy chulg'amga pasaytirilgan o'zgaruvchan tok kuchlanishi beriladi va U_{BY}, E_{AX}, U_{AB}, U_{BC} kuchlanishlar va EYK lar o'lchanadi.



2.8-rasm. *Transformatorning YK chulg'ami uchlari to'g'ri (a) va noto'g'ri (b) belgilangan uchun hamda chulg'am uchlari belgilanishini tajribada tekshirish uchun (d) sxemalar.*

Bu holda magnit o'tkazgichning chekka o'zaklaridagi magnit oqim o'rta o'zak magnit oqimining yarmiga teng, demak, AX va CZ fazaviy chulg'amlarda hosil bo'lgan EYK miqdor jihatdan o'rta o'zakdagi BY fazaviy chulg'am EYK ning («kuchlanishi»ning desa ham bo'ladi, chunki $U_{BY} \approx E_{BY}$) yarmiga teng. Chulg'am uchlari to'g'ri ulanganda A va B yoki B va C klemmalariga ulangan voltmetr o'rta (BY) va chekkadagi fazaviy chulg'amlardan birontasi (AX yoki CZ) da hosil bo'lgan EYK (kuchlanish)larning yig'indisini, ya'ni $U_{AB} = U_{BC} = U_{BY}$ ga teng bo'lgan kuchlanishni ko'rsatadi.

Nazorat savollari:

1. Magnit o'tkazgichning tuzilishi va ahamiyati nimadan iborat?

2. Magnit o'tkazgichi umumiy bo'lgan uch fazali transformatorning magnit sistemasi qanday hosil qilingan?

3. Chulg'amlarning qanday turlari mavjud?

4. Nima uchun vintsimon chulg'amning simlari transpozitsiya qilinadi?

3-BOB. TRANSFORMATORNING SALT ISHLASH REJIMIDAGI ELEKTROMAGNIT JARAYONLAR

3.1. Elektromagnit induksiya hodisasi, transformatorning ishlash prinsipi va elektr yurituvchi kuchlari

Elektromagnit induksiya hodisasi transformator nazariyasining asosini tashkil qiladi. Elektromagnit induksiya hodisasi ikki shaklda namoyon bo'ladi:

1) Faradey ta'rifi. *«Vaqt bo'yicha o'zgarmas bo'lgan magnit maydon kuch chiziqlarini biror tezlik bilan kesib o'tayotgan o'tkazgichda hosil bo'lgan EYK ning qiymati magnit induksiya B ga, o'tkazgich uzunligi l ga va uning harakat tezligi v ga to'g'ri mutanosib bo'ladi, ya'ni $E = Blv$».*

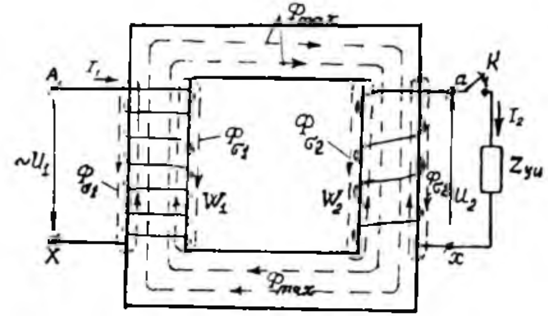
2) Maksvell ta'rifi. *«Magnit oqimi bilan ilashgan berk o'tkazgichdagi EYK ning qiymati magnit oqimi o'zgarish tezligining kattaligiga teng, ya'ni $E = -d\Phi/dt$».*

[**Izoh:** Bundagi EYK ning yo'nalishi rus olimi Lens kashf qilgan prinsip (qoida) bo'yicha aniqlanadi, ya'ni berk o'tkazgich bilan ilashadigan magnit oqim $(d\Phi/dt) > 0$ bo'lganda berk o'tkazgichda vujudga keladigan EYK ning ishorasi «minus» bo'lib, $(d\Phi/dt) < 0$ bo'lganda esa uning ishorasi «plyus» bo'ladi].

3.1-rasmda oddiy bir fazali ikki chulg'amli kuchlanishni pasaytiruvchi transformator magnit o'tkazgich va uning o'zaklariga joylashtirilgan o'ramlar soni w_1 bo'lgan YK (birlamchi) va o'ramlar soni w_2 bo'lgan PK chulg'amlarni tasvirlash o'ng'ay bo'lishi uchun ular har xil o'zakda joylashtirilgan holda ko'rsatilgan. Real transformatorlarda magnit bog'lanishni yaxshi ta'minlash uchun PK va YK chulg'amlar bitta o'zakda joylashtiriladi.

Ishlash prinsipi. Transformator faqat o'zgaruvchan tok zanjirida ishlay oladi, o'zgarmas tokda esa $d\Phi/dt = 0$ bo'lganligidan chulg'amlarda EYK vujudga kelmaydi.

Ikkilamchi chulg'ami yuklamaga ulanmagan transformatorning birlamchi chulg'ami o'zgaruvchan tok manbayiga ulansa, birlamchi chulg'amdan salt ishlash toki $I_1 = I_0$ o'tadi. Uning reaktiv tashkil etuvchisi $I_{0r} \approx I_0$ shu chulg'amda magnit yurituvchi kuch (MYK) $I_{0r}w_1$ ni vujudga keltirib, u esa o'z navbatida, asosiy (Φ) va tarqoq ($\Phi_{\sigma 1}$) qismlardan iborat deb qaraladigan o'zgaruvchan magnit oqimni hosil qiladi ($\Phi_{\sigma 1}$ to'la magnit oqimning taxminan 0,1 ÷ 0,25 foizini tashkil qiladi).



3.1-rasm. Bir fazali transformatorning elektromagnit sxemasi.

Salt ishlayotgan transformatorning EYK lari. Asosiy magnit oqim Ф ning kuch chiziqlari birlamchi va ikkilamchi chulg'am o'ramlari bilan ilashib *elektromagnit induksiya qonuniga asosan* birlamchi chulg'amda o'zinduksiya EYK e_1 va ikkilamchi chulg'amda o'zaro induksiya EYK E_2 larni hosil qiladi. Ularning oniy qiymatlari ***Maksvell*** tomonidan *elektromagnit induksiya hodisasini yangicha ta'riflab kiritgan formulasi* bo'yicha aniqlanadi:

$$e_1 = -w_1 (d\Phi/dt) = -d\psi_1/dt;$$

$$E_2 = -w_2 (d\Phi/dt) = -d\psi_2/dt, \qquad (3.1)$$

bunda: $\psi_1 = w_1\Phi$; $\psi_2 = w_2\Phi$ – tegishlicha birlamchi va ikkilamchi chulg'am magnit oqim ilashishlari, [Vb].

Magnit oqimning sinusoidal bo'lgandagi $\Phi = \Phi_{max}\sin wt$ qiymatini (3.1)ga qo'yib differensiyalagandan keyin, $\cos wt = -\sin(wt - p/2)$ ekanligi hisobga olinsa, quyidagi natija kelib chiqadi:

$$e_1 = \omega_1\Phi_{max}\sin(\omega t - p/2) = E_{1max}\sin(\omega t - p/2);$$

$$e_2 = \omega_2\Phi_{max}\sin(\omega t - p/2) = E_{2max}\sin(\omega t - p/2), \qquad (3.2)$$

bu yerda: $E_{1max} = \omega_1\Phi_{max}$ va $E_{2max} = \omega_2\Phi_{max}$ – tegishlicha birlamchi va ikkilamchi chulg'am EYK larining maksimal qiymatlari, [V].

(3.2) dan *quyidagi xulosa kelib chiqadi.* Transformator chulg'amlaridagi hosil bo'lgan E_1 va E_2 EYK larning vaqt bo'yicha o'zgarish fazasi magnit oqim Φ_{max} dan p/2 burchakka kechikar ekan, ya'ni 90° ga orqada qoladi.

Elektrotexnikaning nazariy asoslaridan ma'lum bo'lishicha, (3.2) dagi sinusoidal shaklda o'zgarayotgan EYK o'zining maksimal qiymatiga $\sin(\omega t - \pi/2) = 1$ da erishadi. EYK larning maksimal (E_{1max} va E_{2max})

qiymatlarini $\sqrt{2}$ ga bo'lib, (3.2) ga $\omega = 2\pi f$ qo'yilsa, EYK larning ta'sir etuvchi (effektiv) qiymatlarini aniqlash formulalariga ega bo'lamiz:

$$\left.\begin{aligned} E_1 &= E_{1max} / \sqrt{2} = \left(2\pi / \sqrt{2}\right) \cdot f\ w_1\ \Phi_{max} = 4{,}44\ f\ w_1\ \Phi_{max}; \\ E_2 &= E_{2max} / \sqrt{2} = \left(2\pi / \sqrt{2}\right) \cdot f\ w_2 \Phi_{max} = 4{,}44\ f\ w_2\ \Phi_{max}. \end{aligned}\right\} \quad (3.3)$$

Tarqoq magnit oqim kuch chiziqlari asosan magnit qarshiligi katta bo'lgan havo, moy, chulg'amning mis yoki aluminiy s'mlari va izolatsiyalar orqali tutashganligidan u mazkur chulg'am MYK ga mutanosib ravishda o'zgaradi.

Tarqoq magnit oqimi Fs_1 kuch chiziqlari faqat birlamchi chulg'am o'ramlari bilan bog'langan holdagi oqim ilashish ($\psi_{\sigma 1} = \Phi_{\sigma 1} w_1$) tufayli ularda EYK $E_{\sigma 1}$ hosil bo'ladi. Uning oniy qiymati quyidagiga teng:

$$e_{\sigma 1} = - w_1\ (d\Phi_{\sigma 1}\ /dt) = - d\Psi_{\sigma 1}/dt. \qquad (3.4)$$

U reaktiv xarakterga ega bo'lib, tok i_0 ga nisbatan 90°Cga orqada qoladi.

Tarqoq EYK ($e_{\sigma 1}$) ning qiymati chulg'amdagi tokka mutanosib ravishda o'zgaradi. Shu tufayli mazkur EYK ni unga ekvivalent (teng kuchli) bo'lgan kuchlanish tushishi (kamayishi) orqali ifodalash mumkin. Uning oniy $E_{\sigma 1}$ va ta'sir etuvchi $E_{\sigma 1}$ qiymatlari quyidagicha aniqlanadi:

$$e_{\sigma 1} = - j i_0 x_1;\ E_{\sigma 1} = - j I_0\ x_1\ , \qquad (3.5)$$

bunda: x_1 – tarqoq magnit oqim tufayli YK chulg'amda hosil bo'ladigan induktiv qarshilik.

Salt ishlash rejimi uchun (indeks «0») kuchlanish va EYK lar muvozanat tenglamasi quyidagicha yoziladi:

$$U_{1.0} = - E_1 + I_0\ x_1 + I_0\ r_1\ . \qquad (3.6)$$

Kuch transformatorining salt ishlashida birlamchi chulg'amdagi kuchlanish tushishi $\Delta U = jI_0 \cdot x_1 + I_0 \cdot r_1$ kuchlanish U_{1N} ning 0,5 foizidan oshmaganligidan ularni e'tiborga olmagan holda, (3.6) ni quyidagicha yozish mumkin:

$$U_{1.0} \approx - E_1 = w_1\ d\Phi\ /\ dt. \qquad (3.7)$$

Bundan: chulg'amga berilgan kuchlanish U_1 shu chulg'amda hosil bo'lgan EYK E_1 ga miqdor jihatdan teng, faza jihatdan esa 180° ga siljigan ekanligi kelib chiqadi.

Kuchlanish va EYK lar ta'sir etuvchi qiymatlarini miqdor jihatdan tahlil qilingan hollarda $U_1 \approx E_1$ deb hisoblash mumkin bo'ladi.

Transformator salt ishlaganda ($I_2 = 0$) ikkilamchi chulg'am kuchlanishi $U_{20} = E_2$ bo'ladi. Demak,

$$U_{10} \approx E_1 ; \; U_{20} = E_2 . \qquad (3.8)$$

Bundan, (3.3) ni ham hisobga olgan holda quyidagi nisbatlar tengligini yozish mumkin:

$$U_{10} / U_{20} \approx E_1 / E_2 = w_1 / w_2 . \qquad (3.9)$$

Bu nisbatni *transformatsiyalash koeffitsienti (k)* deyiladi.

(3.9) dan *amaliy ahamiyatga ega bo'lgan* quyidagi xulosa kelib chiqadi: *agar U_1 kuchlanish berilgan bo'lsa chulg'amlarning w_1 va w_2 o'ramlar sonini tanlash yo'li bilan kuchlanish U_2 ning zaruriy qiymatini olish mumkin ekan.*

Transformatsiyalash koeffitsienti GOST bo'yicha quyidagicha aniqlanadi:

$$k = E_{YK} / E_{PK} = w_{YK} / w_{PK} \approx U_{YK} / U_{PK} , \qquad (3.10)$$

bundagi U_{YK} va U_{PK} kuchlanishlar salt ishlash rejimining nominal qiymatlaridir.

Real transformatorning salt ishlash rejimini xarakterlaydigan tenglamalarni vaqt bo'yicha sinusoidal shaklda o'zgarayotgan kuchlanish, EYK va toklar uchun kompleks shaklida quyidagicha yoziladi:

$$\left.\begin{aligned} &\underline{U}_1 = \underline{E}_1 + j\,\underline{I}_0 \cdot x_1 + \underline{I}_0 \cdot r_1 , \\ &\underline{U}_{20} = \underline{E}_2 , \\ &\underline{I}_1 = \underline{I}_0 = \underline{I}_{0r} + \underline{I}_{0a} , \\ &\underline{I}_2 = 0. \end{aligned}\right\} \qquad (3.11)$$

M u h i m x u l o s a. *Salt ishlashda transformator orqali elektr energiya uzatilmaydi. Bunday rejimda uning ikkilamchi chulg'ami chastotasi bir xil, kuchlanishining qiymati esa boshqa ($E_2 = U_{20}$) bo'lgan o'zgaruvchan tok manbayi vazifasini bajarishi mumkin.*

3.2. Uch fazali transformatorlar salt ishlash rejimining o'ziga xos xususiyatlari

3.1-bandda bayon qilingan umumiy maqsadli bir fazali transformatorning nazariyasi uch fazalida ham simmetrik rejimi uchun asos bo'la oladi.

Umumiy holda transformator chulg'amlaridagi EYK va toklarining vaqt bo'yicha o'zgarishi nosinusoidal bo'lganligidan quyidagi tahlillarda 1-garmonika va yuqori garmonikalardan eng katta qiymatga ega bo'lgani faqat 3-garmonikaning ta'siri ko'rib chiqiladi. [Izoh: *garmonikalar tartibini kichik qavs ichiga olingan «(1)» yoki «(3)» indekslar orqali belgilangan.*]

EYK ning birinchi garmonikalari:

$$\begin{aligned} e_{A(1)} &= E_{(1)max}\sin\omega t, \\ e_{B(1)} &= E_{(1)max}\sin(\omega t - 120°), \\ e_{C(1)} &= E_{(1)max}\sin(\omega t + 120°) \end{aligned} \qquad (3.12)$$

va 3-garmonikalari:

$$\begin{aligned} e_{A(3)} &= E_{(3)max}\sin 3\omega t, \\ e_{B(3)} &= E_{(3)max}\sin 3(\omega t - 120°) = E_{(3)max}\sin 3\omega t, \\ e_{C(3)} &= E_{(3)max}\sin 3(\omega t + 120°) = E_{(3)max}\sin 3\omega t. \end{aligned} \qquad (3.13)$$

(3.13) dan ko'rinishicha, EYK larning 3-garmonikalari barcha fazalarda qiymat jihatdan o'zaro teng va bir xil yo'nalgan ekan.

EYK 3-garmonikasining transformator ishiga ta'siri fazaviy chulg'amlarining ulanish sxemasiga bog'liq bo'ladi. Agar uch fazali transformatorning birlamchi (masalan, YK) chulg'ami «yulduz» sxemasiga ulangan bo'lsa, fazaviy EYK larining 3-garmonikasi liniyaviy EYK larining 3-garmonikasini hosil qilmaydi, chunki «yulduz» sxemasida uchinchi va uch karrali garmonikalar «yulduz»ni tashkil etuvchi ikkita [1) A-X-Y-B va 2) B-Y-Z-C] konturning har bittasida o'zaro qarama-qarshi ta'sir qiladi, ya'ni fazaviy EYK larining 3-garmonikalari uchta fazada ham bir xil yo'nalgan bo'lgani uchun ulardan istalgan juftining ayirmasi 0 ga teng bo'ladi.

Transformator liniyaviy EYK larining o'zgarish egriligida 3-garmonikalar bo'lmaganligidan, ular liniyaviy kuchlanish U_l larning vaqt bo'yicha o'zgarish shaklida ham, binobarin, liniyaviy (I_l) va fazaviy (I_f) toklarining o'zgarish shaklida ham bo'lmaydi.

Magnitlovchi tok I_{0r} ning vaqt bo'yicha o'zgarish shaklida 3-garmonika ($I_{0r(3)}$) ning yo'qligi uni sinusoidal shaklga yaqinlashtiradi, chunki 5 va 7-garmonikalarning amplitudasi 1-garmonika amplitudasiga

nisbatan ancha kichik hamda 5-garmonika teskari ketma-ketlikni hosil qiladi. *Bu hol magnit oqimi Ф ning vaqt bo'yicha o'zgarish shaklini nosinusoidal qiladi,* ya'ni uning tarkibida 3-garmonika bo'ladi.

3-garmonika magnit oqimlari faza jihatdan bir-biriga mos yo'nalganligi tufayli uch sterjenli magnit o'tkazgichda tutasha olmaydi. Bu oqimlar transformatorni sovitish sifatida ishlatiladigan muhit orqali va transformator bakining metall devorlari orqali tutashadi. Ular o'tadigan yo'lning magnit qarshiligi katta bo'lganligi tufayli qiymati kichik bo'ladi. Magnit oqimining 3-garmonikasi $Ф_{0(3)}$ transformator baki devorlarida uyurma tokni vujudga keltirib qo'shimcha isroflarni hosil qiladi. Masalan, magnit induksiya B = 1,4 T bo'lsa, bu isroflar magnit o'tkazgichdagi isroflarning 10 foizini, B =1,6 T bo'lganda esa 50÷65 foizini tashkil qilib, bu holdagi transformatorning ortiqcha qizishi *amaliyot uchun salbiy holdir.*

Uch fazali transformatorning birlamchi chulg'ami *«uchburchak» sxemasiga* ulanganda EYK ning 3-garmonikalari uchta fazaviy chulg'amda ham mos ta'sir etib, shu chulg'amlarning berk konturida tokning 3-garmonikasini hosil qiladi. Salt ishlash tokida 3-garmonika bo'lsa, u holda magnit oqimining o'zgarish shakli va, binobarin, E_1 va E_2 EYK larning vaqt bo'yicha o'zgarish shakli sinusoidaga yaqinlashadi.

Chulg'amlari Y/ Y ulangan uch fazali transformatorning salt ishlashi. Salt ishlash rejimida transformatorning birlamchi chulg'amiga sinusoidal kuchlanish $u_1 = U_{1m} \sin wt$ berilganda vujudga keladigan magnit oqim va hosil bo'ladigan EYK E_1 ham sinusoidal shaklda o'zgaradi. Bu holda salt ishlash tokining tarkibida 1-garmonikadan tashqari yuqori garmonikalar (ulardan eng kattasi 3-garmonika) ham bo'ladi.

Agar chulg'amlar Y sxemasiga ulanganda salt ishlash tokining vaqt bo'yicha o'zgarish shaklida 3-garmonika bo'lmasa magnit oqimi nosinusoidal bo'lib, bu holda guruhlangan transformatorda va magnit sistemasi umumiy bo'lgan uch fazali transformatorda har xil ta'sir qiladi.

Guruhlangan transformatorda magnit sistema har fazada mustaqil bo'lganligidan magnit oqimning 3-garmonikasi $Ф_{(3)}$ xuddi shu oqimning 1-garmonikasi $Ф_{(1)}$ ga o'xshab magnit o'tkazgich orqali tutashadi va, shu sababli $Ф_{(3)}$ning qiymati katta bo'lib $Ф_{(1)}$ ning 15÷20 foiziga yetadi.

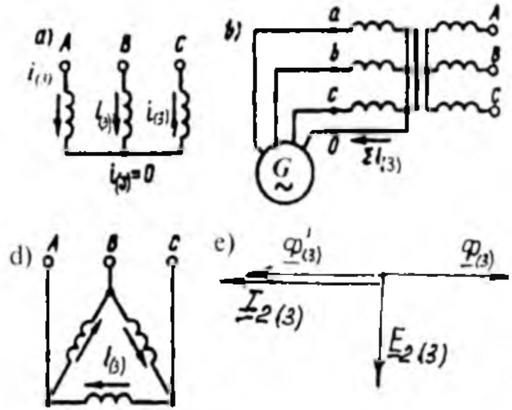
Odatda transformatorlarda magnit sistemasi to'yingan bo'ladi, bunda $E_{(1)}$ va $E_{(3)}$ EYK lar qo'shilib fazaviy EYK ning oniy (e) qiymatini 40÷50

foizga, ta'sir etuvchi (E) qiymatini esa 10÷8 foizga oshiradi. EYK ning bunday oshishi ayrim hollarda xavfli hisoblanadi. Shu cababli guruhlangan transformatorlarda Y/Y ulanish sxemasi ishlatilmaydi.

Chulg'amlari Y/Y ulangan transformator fazaviy EYK ning shakli keskin o'zgarsa ham liniyaviy EYK da 3-garmonika bo'lmay, sinusoidalga yaqin shaklda qoladi.

Transformator chulg'amlari «uchburchak-yulduz» yoki «yulduz-uchburchak» sxemalariga ulanganda transformatorning salt ishlashi. «Yulduz» sxemasiga ulanganda salt ishlash toki tarkibida uning 3-garmonikasi $I_{0(3)}$ bo'lmaydi (3.2,*a*-rasm) va salt ishlash tokining o'zgarish shakli sinusoidaga yaqin bo'ladi, natijada magnit oqimining vaqt bo'yicha o'zgarish shakli nosinusoidal bo'ladi. Shu tufayli magnit oqimning asosiy tashkil etuvchisi (1-garmonikasi)dan tashqari uning yuqori garmonikalari ham bo'ladi.

Magnit oqimning 3-garmonikasi $\underline{\Phi}_{(3)}$ transformatorning ikkilamchi chulg'ami «uchburchak» sxemasi bo'yicha ulangan holda, uning har bir fazasida $\underline{\Phi}_{(3)}$ dan 90° orqada qoladigan EYK ning 3-garmonikasi $\underline{E}_{2(3)}$ ni hosil qiladi. Bu EYK ta'sirida shu chulg'amda vujudga keladigan tokning 3-garmonikasi $\underline{I}_{2(3)}$ EYK $\underline{E}_{2(3)}$ dan faza jihatdan deyarli 90°ga orqada qoladi va uchta fazada ham yo'nalishi bir xil bo'lganligidan berk zanjir bo'yicha harakat qiladi (3.2,c-rasm). Bu tokning orqada qolishiga ikkilamchi chulg'amning konturi katta induktiv qarshilikka egaligi sabab bo'ladi. Tok $\underline{I}_{2(3)}$ ning vektori magnit oqimi vektori $\underline{\Phi}_{(3)}$ ga deyarli qarama-qarshi yo'nalganligi tufayli (3.2,*d*-rasm), $\underline{I}_{2(3)}$ hosil



3.2-rasm. *Chulg'amlarning har xil ulanish sxemalarida toklar 3-garmonikalarining:* ***a)*** *«yulduz»;* ***b)*** *«neytral simi chiqarilgan yulduz» va* ***d)*** *«uchburchak» sxemalaridagi yo'nalishlari;* ***e)*** *transformatorning birorta chulg'amini «uchburchak» sxemasiga ulagan hol uchun vektor diagramma.*

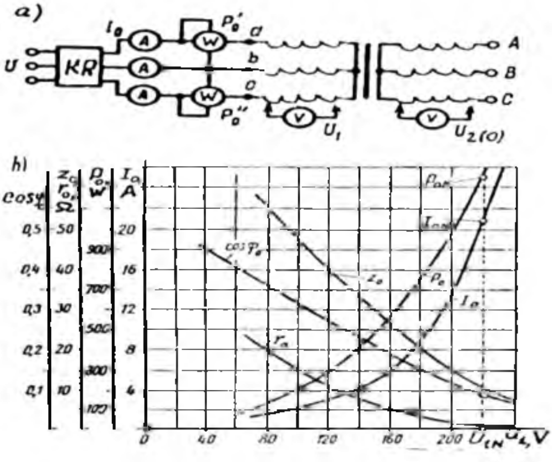
qilgan magnit oqimi $\underline{\Phi}_{(3)}$ ning yo'nalishi shu tok vektori bo'yicha yo'nalib, asosiy oqimning 3-garmonikasi $\underline{\Phi}_{(3)}$ ni muvozanatlaydi. Bu esa magnit o'tkazgichdagi asosiy natijaviy oqim va fazaviy chulg'amlardagi EYK larning shaklini sinusoidaga yaqinlashtiradi. Shunday qilib, transformator chulg'amlaridan birortasi «uchburchak» sxemasi bo'yicha ulanganda magnit oqimi va EYK 3-garmonikalarining zararli ta'siridan saqlar ekan.

3.3. Salt ishlash tajribasi va xarakteristikalari

Birlamchi chulg'ami sinusoidal kuchlanish [$u_1 = U_{(1)max} \cdot \sin wt$]ga ulangan transformatorning ferromagnit o'zagida magnit oqimi sinusoidal ($\Phi_1 = \Phi_{(1)max} \cdot \sin wt$) o'zgarca ham ferromagnit o'zakning magnit to'yinishi sababli uning magnitlanish xarakteristikasi egri chiziqli bo'lgani tufayli magnitlovchi tok I_{0r} ning vaqt bo'yicha o'zgarishi $I_{0r} = f(\omega t)$ sinusoidal bo'lmaydi.

Salt ishlash tajribasi ikkilamchi chulg'amga yuklama ulanmagan ($I_2 = 0$) holda 3.3,*a*-rasmda ko'rsatilgan sxema bo'yicha o'tkaziladi. Transformatorning bitta chulg'amiga rostlagich vositasida beriladigan kuchlanish U_1 ni 0 dan $U_1 = 1,2U_{1N}$ qiymatgacha oshirib, kuchlanish U_1, salt ishlash toki I_0 va salt ishlash quvvati P_0 o'lchab olinadi va ularga asosan quvvat koeffitsienti $\cos\varphi_0$ hisoblanadi.

Tajribadan olingan va hisoblangan ma'lumotlar asosida qurilgan $I_0 = f(U_1)$, $P_0 = f(U_1)$ va $\cos\varphi_0 = f(U_1)$ bog'lanishlarni *salt ishlash xarakteristikalari* deyiladi (3.3,*b*-rasm).



3.3-rasm. *Quvvati S_N = 100 kV·A; U_{1N}/U_{2N} = 6,3 /0,22 kV; chulg'amlari Y/Y ulangan, uch fazali transformatorning salt ishlash tajribasini o'tkazish sxemasi (**a**) va salt ishlash xarakteristikalari (**b**); KR — kuchlanishni rostlagich.*

Uch fazali transformatorda U_1 va I_0 larning qiymatlari har qaysi faza uchun alohida o'lchab olinadi va ularning o'rtacha qiymatlari bo'yicha salt ishlash xarakteristikalari quriladi.

O'zaklari bitta tekislikda joylashgan transformator fazalaridagi salt ishlash toklari bir xil bo'lmaydi, chunki o'rta fazadagi magnit oqim kuch chiziqlari o'tadigan oraliq, chekka fazalarining shunday oraliqlariga nisbatan kam (2.1,c-rasm). Shu tufayli o'rta sterjenda joylashgan fazaning MYK va toki $I_{0,V}$ chekkadagi fazalarga nisbatan kam ($I_{0,B}$< <$I_{0,A}$= $I_{0,C}$) bo'ladi.

I_0=*f*(U_1). Transformatorga berilgan kuchlanish U_1 oshirilishi bilan uning magnit oqimi Φ oshadi, chunki $U_1 \approx E_1 = 4{,}44 f w_1 \Phi_{max}$.

Kuchlanishning kam qiymatlarida magnit zanjir to'yinmagan bo'lib, tok I_0 to'g'ri chiziqli o'zgaradi. Kuchlanishning $U_1 = (0{,}5 \div 0{,}6)\ U_{1N}$ qiymatlaridan boshlab *magnit o'tkazgich to'yina boshlaydi* va shu tufayli transformatorning Z_0, x_0 va $r_0 \approx r_m$ qarshiliklari kamaya boradi. Natijada, salt ishlash tokining reaktiv tashkil etuvchisi $I_{0,r}$ kuchlanish U_1 ga nisbatan tez oshadi (3.3,*b*-rasm).

Salt ishlash toki I_0 reaktiv ($I_{0,r}$) hamda aktiv ($I_{0,a}$) tashkil etuvchilardan iborat bo'ladi: $\underline{I}_0 = \underline{I}_{0,a} + \underline{I}_{0,r}$. Odatda kuch transformatorlarida $I_0 < 0{,}08\ I_{1N}$, uning aktiv tashkil etuvchisi $I_{0,a}$ esa I_0 ning taxminan 10÷0,5 foizini tashkil qiladi. Kuch transformatorlarining nominal quvvatlari oshgan sari I_0 ning nominal tokka nisbatan foizdagi qiymatlari kamaya boradi.

P_0= *f*(U_1). Salt ishlayotgan transformator birlamchi chulg'amining toki va elektr isroflari juda ham kamligidan birlamchi chulg'amdagi elektr isroflarni e'tiborga olmagan holda, transformatorga berilgan aktiv quvvat magnit o'tkazgichdagi gisterezis va uyurma toklar tufayli vujudga keladigan magnit isroflarni qoplashga sarflanadi, deb hisoblanadi.

Magnit o'tkazgichdagi isroflar $P_m \sim B^2$ ga va chastotaning taxminan 1,3-darajasiga bog'liq bo'ladi. U_1 = const va f = const bo'lganda, magnit isroflarining bog'liqligini taxminan quyidagicha yozish mumkin:

$$P_m \approx P_0 = \text{sonst.} \qquad (3.14)$$

Quvvati 10÷1000000 kV·A bo'lgan zamonaviy kuch transformatorlarida salt ishlash isroflar nominal yuklamadagi quvvat isroflariga nisbatan tegishlicha 1,5÷0,05 % ni tashkil etsa ham, *mavsumiy yuklama bilan ishlayotgan transformatorning yillik foydali ish koeffitsienti qiymatiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi*, chunki salt ishlash xarakteristikalari yuklama qiymatiga bog'liq bo'lmay, balki $P_0 \sim U_1^2$ tufayli

transformatorning tarmoqqa ulangan vaqtining davomiyligiga bog'liq bo'ladi.

Salt ishlash tajribasida nominal kuchlanish (U_{1N})ga to'g'ri kelgan muhim parametrlaridan salt ishlash toki I_{0N} va isroflari P_{0N} standart bilan me'yorlangan bo'ladi.

$\cos\varphi_0 = f(U_1)$. Quvvat koeffitsienti $\cos\varphi_0$ uch fazali transformator uchun tegishlicha quyidagi formula bo'yicha aniqlanadi:

$$\cos\varphi_0 = P_0 / (\sqrt{3}\, U_1 I_0), \qquad (3.15)$$

bunda P_0 — uch fazaning aktiv quvvati, W.

Salt ishlash rejimda magnit o'tkazgichning to'yinishi osha borgan sari $\underline{I}_0$ ning reaktiv tashkil etuvchisi I_{0r} kuchlanishga nisbatan tez oshib, aktiv tashkil etuvchisi I_{0a} esa kam o'zgaradi. Natijada, kuchlanish $\underline{U}_1$ va tok $\underline{I}_0$ vektorlari orasidagi burchak φ_0 oshishi tufayli $\cos\varphi_0$ kamaya boradi.

Salt ishlash tajribasidan olingan ma'lumotlar bo'yicha *transformator uchun muhim bo'lgan parametrlar* U_{1N} dagi qiymatlar asosida aniqlanadi:

1) transformatsiyalash koeffitsienti $k \approx U_{1N} / U_{20}$, bunda U_{1N} — YK chulg'am nominal kuchlanishi; U_{20} — birlamchi chulg'am kuchlanishi U_{1N} dagi PK chulg'am kuchlanishi; **2)** salt ishlash isroflari R'_0; **3)** salt ishlash tokining qiymati $i_{0(\%)} = (I_0/I_{1N}) \cdot 100$; **4)** magnitlovchi zanjirning aktiv qarshiligi r_0. Transformatorning birlamchi chulg'am aktiv qarshiligi r_1 magnitlovchi zanjirning hisobiy aktiv qarshiligi r_m ga nisbatan bir necha yuz marta kichik ($r_m > r_1$) bo'lgani uchun $r_1 \approx 0$ deb hisoblaganda $r_0 \approx r_m$ bo'ladi.

Transformator magnitlovchi konturining to'la Z_0 , hisobiy aktiv $r_m \approx r_0$ va induktiv x_0 qarshiliklari quyidagicha aniqlanadi:

a) birlamchi chulg'ami «Y» sxemaga ulangan uch fazali transformator uchun:

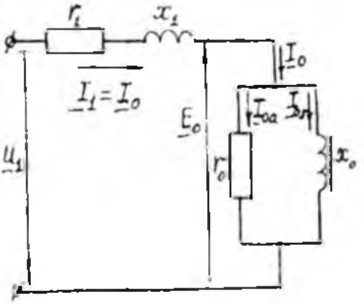
$$Z_0 = U_1 / (\sqrt{3}\, I_0),\ r_0 = P_0 / (3I_0^2),\ x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}\ ; \qquad (3.16)$$

b) birlamchi chulg'ami «Δ»sxemaga ulangan uch fazali transformator uchun

$$Z_0 = \sqrt{3}\, U_1 / I_0\ ,\ r_0 = P_0 / I_0^2\ ,\ x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}\ . \qquad (3.17)$$

Transformatorning salt ishlash rejimi uchun almashtirish sxemasi (3.4-rasm)dan ko'rinishicha, uning $\underline{Z}_0$, r_0 , x_0 parametrlari quyidagi yig'indilardan iborat bo'ladi:

$$\underline{Z}_0 = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_m \, ; \; r_0 = r_1 + r_m \, ; \; x_0 = x_1 + x_m \, . \qquad (3.18)$$



3.4-rasm. *Transformatorning salt ishlash rejimi uchun almashtirish sxemasi.*

Transformatorning birlamchi va ikkilamchi chulg'am qarshiliklari (r_1 va r_2) tajriba yo'li bilan chulg'amlarga alohida-alohida o'zgarmas tok berib aniqlanadi.

Transformator chulg'amlarining r_1 va x_1 qarshiliklari uning salt ishlash qarshiliklari (r_0 va x_0) ga nisbatan bir necha yuz marta kichik. Shu sababli o'rta va katta quvvatli transformatorlarning salt ishlashidagi almashtirish sxema parametrlarini magnitlovchi kontur parametrlariga teng deb hisoblash mumkin, ya'ni: $\underline{Z}_0 \approx \underline{Z}_m$; $r_0 \approx r_m$; $x_0 \approx x_m$.

Nazorat savollari:

1. Transformatorning ishlashi nimaga asoslangan?

2. Uch fazali transformatorlar salt ishlash rejimining o'ziga xos xususiyatlari nimalardan iborat?

3. Salt ishlash tajribasidan qanday parametrlari aniqlanadi?

4-BOB. SIMMETRIK YUKLAMA ULANGAN TRANSFORMATORDAGI ELEKTROMAGNIT JARAYONLAR

4.1. Lens qoidasi, yuklama ulangan transformatorning muvozanat tenglamalari

Agar transformatorning ikkilamchi chulg'amiga yuklama (Z_{yu}) ulansa (3.1-rasmda kalit «K» ulangan hol), EYK E_2 ta'sirida shu chulg'amdan I_2 tok o'tib, MYK I_2w_2 ni vujudga keltiradi. Bu MYK asosiy magnit oqimga aks ta'sir qilishdan tashqari kuch chiziqlari nomagnit yo'llar orqali faqat shu chulg'am o'ramlari bilan ilashadigan tarqoq magnit oqim Φ_{s2} ni ham hosil qiladi. Ikkilamchi chulg'am *MYK I_2w_2 ning asosiy magnit oqimga ko'rsatadigan ta'sirini* Lens qoidasi yordamida tushuntirish mumkin.

Lens qoidasining ta'rifi: *«O'zgarayotgan magnit oqim ilashgan berk o'tkazuvchi kontur (zanjir)da shunday yo'nalishdagi EYK hosil bo'ladiki, uning vujudga keltirgan toki va u bilan bog'liq bo'lgan mexanik kuchlar magnit oqimning o'zgarishiga aks ta'sir qiladi».*

Demak, agar ikkilamchi chulg'amga aktiv-induktiv yuklama ulansa, undan o'tayotgan tokning reaktiv tashkil etuvchisi I_{2r} vujudga keltirgan MYK $I_{2r}w_2$ transformatorning birlamchi chulg'am MYK I_0w_1 ga teskari yo'nalgan bo'lib, asosiy magnit oqim Φ ni kamaytirishga, aktiv-sig'imiy yuklamada esa I_0w_1 ga mos yo'nalgan bo'lib, asosiy magnit oqimni oshirishga intiladi.

Aktiv-induktiv yuklamada natijaviy oqimning kamayishi birlamchi chulg'amda EYK E_1 ning kamayishiga olib keladi. Natijada, elektr tarmog'ining kuchlanishi $U_1 = U_{1N} =$ const bo'lganligidan $U_1 - E_1 = \Delta E$ tufayli hosil bo'lgan birlamchi chulg'amdagi tokning qiymati I_0 dan I_1 gacha, ya'ni yuklama tokining magnitsizlovchi ta'siri to'la kompensatsiya bo'lgunga qadar oshishiga sababchi bo'ladi va natijada transformatordagi magnit oqim o'zining dastlabki qiymatiga taxminan tenglashadi.

Shunday qilib, ikkilamchi chulg'amiga yuklama ulangan tranformatorda magnit oqim Φ to'la tok qonuniga binoan birlamchi va ikkilamchi chulg'am MYK larining birgalikdagi ta'siri tufayli yaratilib, ularning ta'sir etuvchi qiymatlarining geometrik yig'indisi salt ishlashdagi birlamchi chulg'am MYK I_0w_1 ga taxminan teng bo'ladi:

$$\underline{I}_1 w_1 + \underline{I}_2 w_2 \approx \underline{I}_0 w_1 \;. \qquad (4.1)$$

Bu ifodani ***transformatorning MYK lari muvozanat tenglamasi*** deyiladi. *Bunda:* $\underline{I}_1 w_1$ – yuklama ulangan transformatorning birlamchi chulg'amida vujudga keladigan MYK; $\underline{I}_2 w_2$ – ikkilamchi chulg'amda hosil bo'ladigan MYK; $\underline{I}_0 w_1$ – salt ishlayotgan transformator birlamchi chulg'amining MYK.

(4.1) tenglamaning ikkala tomonini w_1 ga bo'lamiz va $\underline{I}_2(w_2/w_1) = \underline{I}'_2$ belgilashdan keyin hosil bo'lgan tenglamani quyidagicha yozamiz:

$$\underline{I}_1 \approx \underline{I}_0 + (-\underline{I}'_2). \qquad (4.2)$$

Bu ifoda transformatorning ***toklar muvozanat tenglamasidir.***

(4.2) dan *quyidagi xulosa* kelib chiqadi: transformator birlamchi chulg'amining toki I_1 2 ta tokning geometrik yig'indisidan iborat ekan:

1) I_0 – birlamchi chulg'amda MYK $I_0 w_1$ ni hosil qilib magnit o'tkazgichda asosiy magnit oqimni vujudga keltiradi;

2) $(-I'_2)$ – yuklama tokining ta'siri tufayli birlamchi chulg'amdagi tok shu kattalikka oshadi va uning birlamchi chulg'amda hosil qilgan $(-I'_2 w_1)$ MYK. *Lens qoidasiga binoan* ikkilamchi chulg'am MYK $I_2 w_2$ ning ta'sirini kompensatsiya qiladi.

Natijaviy (asosiy) magnit oqimning maksimal qiymati Φ_{max} ni aniqlashda magnit zanjirlari uchun Om qonunidan foydalanamiz:

$$\Phi_{max} = \sqrt{2}\,(\underline{I}_1 w_1 + \underline{I}_2 w_2) / r_m . \qquad (4.3)$$

Magnit oqimning bu qiymatini (3.3) formuladan ham aniqlash mumkin.

Bu holda (3.8) dagi $U_1 \approx E_1$ ni hisobga olib quyidagiga ega bo'lamiz:

$$\Phi_{max} \approx U_1 / (4{,}44\, f\, w_1). \qquad (4.4)$$

Demak, *birlamchi chulg'amga berilgan kuchlanish U_1 va uning chastotasi* f=const *bo'lganda transformator magnit o'tkazgichidagi asosiy oqim F ikkilamchi chulg'amga ulangan yuklamaning qiymatiga bog'liq emas ekanligi* transformatorning muhim xossalaridan biridir.

Birlamchi va ikkilamchi chulg'amlar elektr zanjirlari uchun EYK va kuchlanishlar muvozanat tenglamalari tegishlicha ularning ta'sir etuvchi qiymatlari orqali quyidagicha ifodalanadi:

$$\left.\begin{aligned} \underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 + j\underline{I}_1 x_1 + \underline{I}_1 r_1, \\ \underline{U}_2 &= -\underline{E}_2 + j\underline{I}_2 x_2 + \underline{I}_2 r_2. \end{aligned}\right\} \qquad (4.5)$$

Kuch transformatorlarida yuklama tokining nominal va unga yaqin qiymatlarida birlamchi chulg'amdagi kuchlanish tushishi ($\Delta U_1 = I_1 r_1 + I_1 x_1$) nominal kuchlanish U_{1N} ning taxminan 2÷5 foizidan

oshmaydi. Shu sababli transformatorga yuklama ulangan rejimda ham fizik jarayonni oydinlashtirish maqsadida $\Delta U_1 \approx 0$ deyilganda, (3.8) dagi singari $|U_1| \approx |E_1|$ ga ega bo'lamiz.

Transformatorning salt ishlashdagi MYK $I_0 w_1$ uning normal yuklama bilan ishlagandagi MYK $I_1 w_1$ ning taxminan 0,5÷3,0 (ya'ni juda kam) foizini tashkil etganligidan (4.1) tenglikdagi $I_0 w_1$» 0 deb qabul qilinsa, jarayonning fizik ma'nosini oydinlashtirishga imkon yaratiladi. Bunday cheklanmada chulg'amlardagi toklar, ular vujudga keltirgan MYK lar o'zaro muvozanatlashadigan ravishda yo'nalgan bo'ladi, ya'ni

$$I_2 = -I_1 (w_1 / w_2), \qquad (4.6)$$

bundan quyidagi nisbatni yozish mumkin:

$$I_1 / I_2 \approx w_2 / w_1 . \qquad (4.7)$$

(4.7) dan, *YK va PK chulg'amlardagi toklar nisbati ularning o'ramlari soni nisbatiga teskari mutanosibda bo'lar ekan*, degan xulosa kelib chiqadi.

Zamonaviy kuch transformatorlarining FIK katta (η = 0,97÷0,99) bo'lganligidan, yuklama ulangan hol uchun fizik jarayonning mohiyatini ochish maqsadida birlamchi va ikkilamchi chulg'amlardagi elektr quvvatlarni bir-biriga tenglaganda ($I_1 U_1 \approx I_2 U_2$) quyidagi nisbatlar tengligi kelib chiqadi:

$$I_1 / I_2 \approx U_2 / U_1 , \qquad (4.8)$$

demak, transformatorda toklar uning kuchlanishiga teskari mutanosiblikda bo'lar ekan.

4.2. Transformatorning ikkilamchi chulg'am kattaliklarini birlamchi chulg'amga keltirish va vektor diagrammalari

Umumiy holda transformatorning birlamchi va ikkilamchi chulg'am toklari, kuchlanishlari, EYK va qarshiliklari bir-biridan miqdor jihatdan ancha farq qiladi. Bu holda transformatorning birlamchi va ikkilamchi chulg'am elektr kattaliklarini vektor diagrammada bir xil masshtabda tasvirlashning imkoniyati bo'lmaydi.

Bu o'ng'aysizliklarni bartaraf etish maqsadida o'ziga xos *hisobiy usuldan foydalaniladi*, ya'ni birlamchi va ikkilamchi chulg'am o'ramlari soni har xil ($w_1 \neq w_2$) bo'lgan real transformator, ikkilamchi chulg'am o'ramlari soni birlamchi chulg'am o'ramlari soniga teng ($w'_2 = w_1$) bo'lgan ekvivalent transformator bilan almashtiriladi. Bunday transformatorni *keltirilgan transformator* deyiladi. 4.2-rasmda bunday transformatorning ekvivalent («*a*») va almashtirish («*b*») sxemalari ko'rsatilgan.

Keltirilgan elektr kattaliklaridan foydalanish transformatordagi elektromagnit jarayonlarni tahlil qilishni soddalashtiradi, vektor diagrammalar qurishni osonlashtiradi, chulg'amlar orasidagi magnit bog'lanish o'rniga elektr bog'lanish ishlatiladigan almashtirish sxemasini qurishga imkon yaratadi.

Keltirilgan transformatordagi barcha elektromagnit jarayonlar real transformatorniki bilan bir xil bo'lishini, ya'ni MYK, magnit oqim hamda transformatsiyalash koeffitsienti «*k*» ga bog'liq bo'lmagan aktiv va reaktiv quvvatlarning o'zgarmas bo'lishini ta'minlash zarur bo'ladi. Bundan, keltirilgan kuchlanish va toklarning faza siljishi o'zgarmas bo'lishi talab qilinadi. Shu maqsadda ***«keltirilgan» ikkilamchi chulg'am elektr parametrlarini aniqlash tartibi*** quyida ko'rsatilgan.

1. Magnit oqimi Φ ni o'zgarmas qilish uchun ikkilamchi chulg'am (uch fazali transformator uchun fazaviy chulg'am) MYK $w'_2 = w_1$ bo'lgan transformatorda quyidagicha muvozanatda bo'lishi kerak:

$$I'_2 w'_2 = I_2 w_2 \ . \qquad (4.9)$$

Mazkur shart (ya'ni muvozanat) bajarilishi uchun keltirilgan va real chulg'amlarning shakli, demak, bo'ylama kesimi ham bir xil bo'lishi kerak. Bu esa keltirilgan chulg'amdagi har bitta o'ram kesimining « *k* ≈ marta o'zgarishiga olib keladi.

(4.9) dan «keltirilgan» chulg'amning toki I'_2 ni topamiz:

$$I'_2 = I_2 \ (w_2 \ / \ w'_2 \ ) = I_2 \ / \ k \ . \qquad (4.10)$$

bunda $k = w_1 / w_2$ – transformatsiyalash koeffitsienti; $w'_2 = w_1$.

2. Magnit oqimi o'zgarmas bo'lganda chulg'amdagi EYK chulg'amning o'ramlari soniga to'g'ri mutanosibda bo'ladi va keltirilgan ikkilamchi chulg'amda EYK E'_2 ning qiymati «*k*» marta oshadi. Uning qiymati keltirilgan va real chulg'amlar elektromagnit quvvatlarini o'zaro tenglab ($E'_2 I'_2 = E_2 I_2$) aniqlanadi:

$$E'_2 = E_2 \ (I_2 \ / \ I'_2 \ ) = k \ E_2 \ . \qquad (4.11)$$

3. Keltirilgan va real chulg'amlarning to'la quvvatlarini taxminan o'zaro tenglab ($U'_2 I'_2 \approx U_2 I_2$), undan «keltirilgan» chulg'am kuchlanishi U'_2 topiladi:

$$U'_2 = U_2 \ (I_2 \ / \ I'_2 \ ) = k \ U_2 \ . \qquad (4.12)$$

4. Keltirilgan chulg'am o'ramlari soni va o'ram kesimi «*k*» marta o'zgarganligi sababli uning aktiv qarshiligi «*k*» marta katta bo'ladi. Mazkur aktiv qarshilik (r'_2)ni aniqlashda keltirilgan va real chulg'amlardagi isroflar tengligi $[(I'_2)^2 r'_2 = I^2_2 \ r_2 \ ]$ dan foydalaniladi [bunda (4.10)ga ko'ra $I'_2 = I_2 / k$]:

$$r'_2 = (I_2 / I'_2)^2 r_2 = k^2 r_2 , \qquad (4.13)$$

5. Keltirilgan chulg'amning geometrik o'lchamlari real chulg'amniki bilan bir xil bo'lganda keltirilgan chulg'amning x'_2 induktiv qarshiligi o'ramlar soni kvadrati $(w')^2$ga bog'liq bo'ladi. Uning qiymati keltirilgan va real chulg'amlar reaktiv quvvatlari tengligi $[(I'_2)^2 x'_2 = I_2^2 x_2]$dan foydalaniladi:

$$x'_2 = (I_2 / I'_2)^2 x_2 = k^2 x_2 . \qquad (4.14)$$

6. Transformator ikkilamchi chulg'amining keltirilgan to'la qarshiligi quyidagicha aniqlanadi:

$$\underline{Z}'_2 = r'_2 + x'_2 = k^2 (r_2 + jx_2) = k^2 \underline{Z}_2 . \qquad (4.15)$$

7. Ikkilamchi chulg'am chiqish uchlariga ulangan yuklamaning keltirilgan to'la qarshiligi ham (4.15) ga o'xshash holda topiladi:

$$\underline{Z}'_{yu} = k^2 \underline{Z}_{yu} . \qquad (4.16)$$

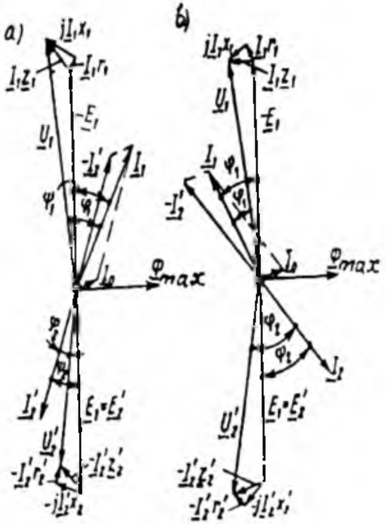
Keltirilgan transformator uchun kuchlanishlar va toklar tenglamalari kompleks (ya'ni vektor kattalik) ko'rinishida quyidagicha yoziladi:

$$\left.\begin{aligned} \underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 + \underline{I}_1\underline{Z}_1 = -\underline{E}_1 + j\underline{I}_1 x_1 + \underline{I}_1 r_1, \\ \underline{U}'_2 &= \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2 \underline{Z}'_2 = \underline{E}'_2 - j\underline{I}'_2 x'_2 - \underline{I}'_2 r'_2, \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_0 + (-\underline{I}'_2). \end{aligned}\right\} \qquad (4.17)$$

Vektor diagrammalari. (4.17) tenglamalar sistemasi yordamida yuklama ulangan keltirilgan transformatorning vektor diagrammalarini ma'lum masshtabda qurib, ular yordamida transformatorning kuchlanishi, EYK va toklarini aniqlash mumkin.

Diagrammaning qurilish ketma-ketligi transformator ish rejimining qanday kattaliklarda berilgani va diagrammani qurib undan qanday kattaliklar qiymatlarini topish talab qilinganiga bog'liq bo'ladi.

Aytaylik, ikkilamchi tok I'_2 va amaliyotda ko'p uchraydigan aralash



4.1-rasm. *Transformatorning aktiv-induktiv (**a**) va aktiv-sig'imiy (**b**) yuklamalar uchun vektor diagrammalari.*

aktiv-induktiv yuklama qarshiligi $Z'_{yu} = r'_{yu} + jx'_2$ (induktiv yuklamada $x'_{yu} > 0$, sig'imiy yuklamada esa $x'_{yu} < 0$) ma'lum bo'lgan holda, ikkilamchi kuchlanish U'_2, birlamchi chulg'am EYK E_1, magnitlovchi toki I_1 va kuchlanishi U_1 larni topish talab qilingan bo'lsin.

Vektor diagrammani qurishda magnit oqim $\underline{F}_{max}$ va undan 90° orqada qoladigan yo'nalishda $E_1 = \underline{E}'_2$ vektori qo'yiladi (4.1-rasm), chunki vaqt bo'yicha sinusoidal shaklda o'zgarayotgan EYK lar o'zlarining nol qiymatlaridan magnit oqim $\underline{\Phi}_{max}$ga nisbatan chorak davr (90°)ga kechikib o'tadi. *Elektrotexnikaning nazariy asoslariga ko'ra* ikk.ta vektor kattalikdan soat milining harakati tomoniga siljigan vektorni orqada qolgan hisoblanadi.

Magnit o'tkazgichdagi va birlamchi chulg'amdagi elektr isroflarni kompensatsiya qilish uchun tok I_{0a} ga mutanosib ravishda o'zgaradigan aktiv quvvat ($P_0 \sim I_{0a}$)ni elektr tarmog'idan olgani tufayli transformatorning salt ishlash toki $\underline{I}_0$ magnit oqim vektori $\underline{\Phi}_{max}$ dan a burchakka oldin keladi.

Ikkilamchi chulg'am toki $\underline{I}'_2$ aktiv-induktiv yuklamada shu chulg'am EYK $\underline{E}'_2$ dan ψ_2 burchakka, kuchlanishi $\underline{U}'_2$ dan esa φ_2 burchakka orqada qoladi. Bu burchaklar quyidagicha aniqlanadi:

$$\psi_2 = \mathrm{arctg}\,(x'_2 + x'_{yu})/(r'_2 + r'_{yu}); \qquad (4.18)$$

$$\varphi_2 = \mathrm{arctg}\,(x'_{yu}/r'_{yu}). \qquad (4.19)$$

Ikkilamchi kuchlanish vektori $\underline{U}'_2$ ni qurish uchun E'_2 vektoridan ikkilamchi chulg'amning reaktiv qarshiligidagi ($j\,\underline{I}'_2 x'_2$) va aktiv qarshiligidagi ($\underline{I}'_2 r'_2$) kuchlanish pasayishlarini ayiramiz. Induktiv qarshiligidagi kuchlanish pasayishi ($j\underline{I}'_2 x'_2$) vektori tok vektori $\underline{I}'_2$ dan 90° oldinda bo'ladigan yo'nalishda chiziladi. Shu sababli $\underline{E}'_2$ vektori uchidan $\underline{I}'_2$ vektoriga perpendikular yo'nalishda ($-\underline{I}'_2 x'_2$) vektorini, uning uchidan esa ($-\underline{I}'_2 r'_2$) vektorini $\underline{I}'_2$ vektoriga parallel ravishda yo'naltirib, ($-\underline{I}'_2 r'_2$) va $\underline{E}'_2$ vektorlari uchlarini birlashtirganda ikkilamchi chulg'am ichki kuchlanishlar pasayishi uchburchagining gipotenuzasi ($-\underline{I}'_2 Z'_2$) ni olamiz. ($-\underline{I}'_2 r'_2$) vektori uchini «0» nuqta bilan birlashtirib $\underline{U}'_2$ vektorini aniqlaymiz. Kuchlanish vektori $\underline{U}'_2$ ikkilamchi tok vektori ($\underline{I}'_2$) dan φ_2 burchakka oldinda bo'ladi.

Bundan keyin toklar muvozanat tenglamasidan foydalanib birlamchi tok vektori $\underline{I}_1$ ni hosil qilamiz. Buning uchun $\underline{I}'_2$ vektoriga qarama-qarshi yo'nalishida ($-\underline{I}'_2$) vektorni yo'naltiramiz. $\underline{I}_0$ va ($-\underline{I}'_2$) vektorlarni geometrik qo'shish natijasida $\underline{I}_1$ vektori hosil qilinadi.

Birlamchi kuchlanish vektori $\underline{U}_1$ ni qurish uchun $\underline{E}_1 = \underline{E}'_2$ vektoriga teng va qarama-qarshi yo'naltirib $(-\underline{E}_1)$ vektori chiziladi. Unga birlamchi chulg'am aktiv kuchlanish pasayishi $(\underline{I}_1 r_1)$ vektorini $(-\underline{E}_1)$ vektori uchidan $\underline{I}_1$ tok vektoriga parallel, reaktiv kuchlanish pasayishi $(j\underline{I}_1 x_1)$ vektorini esa $\underline{I}_1$ vektoridan 90° oldinda bo'ladigan yo'nalishda qo'yiladi va uning uchini 0 nuqta bilan birlashtirilganda $\underline{U}_1$ vektorini beradi. $\underline{U}_1$ vektori tok $\underline{I}_1$ dan j_1 burchakka oldin ketadi.

Transformatorning ikkilamchi zanjiriga ulangan katta sig'imli aktiv-sig'imiy yuklama $(Z_{yu} = r_{yu} - jx_{yu})$ da vektor diagrammani qurish tartibi oldingidek bo'ladi-yu, lekin uning umumiy ko'rinishi ancha o'zgaradi. Bu holda $\underline{I}'_2$ tok vektori $\underline{E}'_2$ dan $y_2 = \text{arctg}\,(x'_{yu} - x'_2) / (r'_{yu} + r'_2)$ burchakka oldin ketadi.

4.3. Ikki chulg'amli transformatorning almashtirish sxemasi

Transformatorning elektromagnit hisobini osonlashtirish maqsadida uning chulg'amlari orasidagi magnit bog'lanishni elektr jihatdan bog'langan holda tasvirlanishi (4.2,*b*-rasm) *almashtirish sxema* deb yuritiladi va uning tuzilmasi transformator ish jarayonini to'la ifodalaydigan (4.17) tenglamalar sistemasiga mos kelishi lozim.

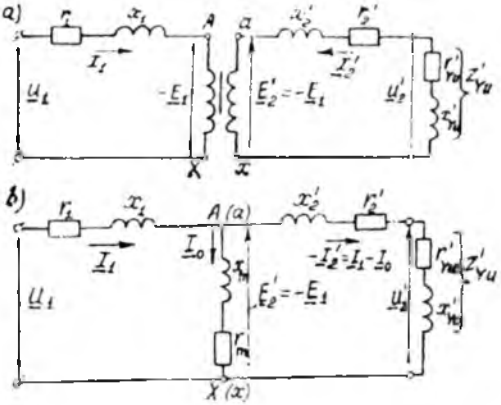
Simmetrik rejimdagi uch fazali transformatorda almashtirish sxema faqat bitta faza uchun quriladi.

Salt ishlash toki $\underline{I}_0 = \underline{I}_{0.a} + \underline{I}_{0.r}$ o'tadigan magnitlovchi shoxobcha A—X (yoki *a*—x) bo'lib, 4.3,*a*-rasmda birlamchi chulg'am qarshiliklari $(r_1,\ x_1)$ va ikkilamchi chulg'am qarshiliklari $(r'_2$ va $x'_2)$ tegishli chulg'amlardan chiqarilib ularga ketma-ket ulangan.

Keltirilgan transformatorda birlamchi va ikkilamchi chulg'am EYK lari o'zaro teng $(\underline{E}_1 = \underline{E}'_2)$ bo'lganligidan 4.2,*a*-rasmdagi «A» va «*a*» nuqtalarning, shuningdek, «X» va «x» nuqtalarning ham potensiallari bir xil bo'lib, magnit bog'langan sxemadagi (4.2,*a*-rasm) bir xil nomli nuqtalarni elektr jihatdan tutashtirib 4.2,*b*-rasmdagi sxema bilan almashtirishga imkon beradi.

Transformatorning salt ishlash rejimi uchun almashtirish sxemasida (3.4-rasm) chulg'amlari elektr jihatdan bog'langan almashtirish sxemada magnitlovchi konturdagi jarayonning fizik mohiyatini to'la aks ettiruvchi aktiv va induktiv qarshiliklarning parallel ulangan zanjiri ko'rinishida tasvirlangan. *Hisoblarni osonlashtirish maqsadida* qarshiliklari parallel ulangan magnitlovchi zanjirni ketma-ket ulangan zanjirga almashtiriladi (4.2,*b-rasm*). Buni transformatorning ***T-simon almashtirish sxemasi***

deyiladi va u amalda keng ishlatiladi.



4.2-rasm. *Transformatorning ekvivalent va almashtirish sxemalari:* ***a*** *– chulg'amlari magnit maydon orqali bog'langan ekvivalent sxema;* ***b*** *– magnitlovchi kontur qarshiliklari ketma-ket ulangan T-simon almashtirish sxemasi.*

Almashtirish sxema quyidagi uchta shoxobchadan iborat:

1) birlamchi chulg'amning qarshiligi $Z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2}$ va toki I_1 bo'lgan shoxobcha; 2) ikkilamchi chulg'amning qarshiligi $Z'_2 = \sqrt{(r'_2)^2 + (x'_2)^2}$ va toki $(-I'_2)$ bo'lgan shoxobcha; 3) magnitlovchi konturning qarshiligi $Z_0 = \sqrt{r_0^2 + x_0^2}$ va toki I_0 bo'lgan shoxobcha.

Almashtirish sxemada Z_1 va Z'_2 qarshiliklar o'zgarmas deb qabul qilinadi, yuklama qarshiligi Z'_{yu} esa transformatorning ish sharoitida beriladi va o'zgarib turishi mumkin. U_1=const bo'lganda Z_0=const deb hisoblash mumkin.

4.4. Qisqa tutashuv tajribasi va xarakteristikalari

Birlamchi chulg'ami kuchlanish U_{1N} ga ulangan transformatorning ikkilamchi chulg'am tomonidan qisqa tutashuvning sodir bo'lishi *avariya rejimi* bo'ladi. Bunday rejimda chulg'amlardan o'tadigan toklar nominal tokka nisbatan bir necha o'n marta katta bo'lganligidan transformator uchun xavflidir.

Qisqa tutashuv tajribasi muhim amaliy ahamiyatga egadir, chunki undan qisqa tutashuv isroflari R'_{qt} va kuchlanishi U_{qt} hamda almashtirish sxemaning parametrlari aniqlanadi. Bu tajribani o'tkazish uchun PK

tomonidan uch fazalida fazaviy chulg'am uchlarini qisqa tutashtirib (4.3,*a*-rasm). YK chulg'amga pasaytirib beriladigan kuchlanish U_{qt} ni 0 dan boshlab chulg'amdagi tokning qiymati nominalga yetguncha oshiriladi. Qisqa tutashuv toki $I_{qt} = I_{1N}$ bo'lgandagi kuchlanishni *qisqa tutashuv kuchlanishi* U_{qt} deb ataladi va u transformatorning *muhim parametrlaridan biridir*. Kuch transformatorlarida U_{qt} nominal kuchlanish U_{1N} ning 4,5÷14,5 foizini tashkil etadi. Bu tajribada kuchlanish U_{qt}, tok I_{qt} va quvvat R_{qt} lar o'lchab olinadi. Bu qiymatlardan qisqa tutashuvdagi quvvat koeffitsienti $\cos\varphi_{qt}$ hisoblab topiladi. Transformatorning qisqa tutashuv xarakteristikalari: $I_{qt} = f(U_{qt})$, $P_{qt} = f(U_{qt})$ va $\cos\varphi_{qt} = f(U_{qt})$ 4.2,b-rasmda ko'rsatilgan.

$I_{qt} = f(U_{qt})$. Bu tajribada kuch transformatorlari chulg'amiga beriladigan kuchlanishning qiymati U_N ga nisbatan ancha kam bo'lganligidan, uning magnit o'tkazgichi to'yinmagan bo'ladi va tok I_{qt} ning o'zgarishi to'g'ri chiziqli bo'ladi.

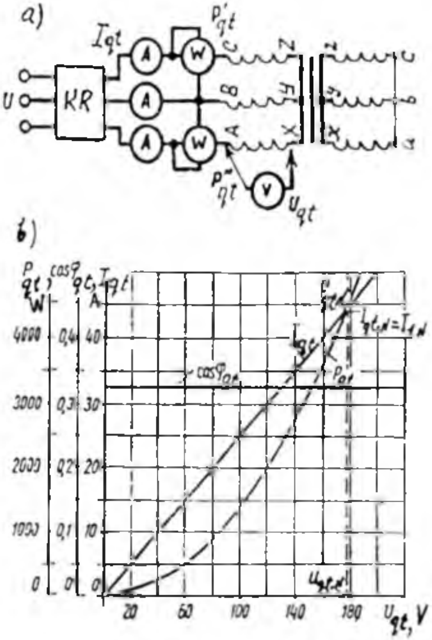
$P_{qt} = f(U_{qt})$. Ikki chulg'amli kuch transformatorlarida, U_{qt} kichik bo'lganligidan qisqa tutashuvdagi magnit isroflari (P'_m)U_{1N} dagi magnit isroflarga nisbatan ancha kichik bo'ladi. Bu holda magnitlovchi tok ($I_m \approx I_0$) ni hamda magnit isroflari (P'_m) ni e'tiborga olmasa ham bo'ladi va birlamchi chulg'amga berilgan quvvat P_{qt} ikkala chulg'am elektr isroflarini qoplashga sarflanadi ($P_{qt} \approx P'_e$), deb hisoblanadi.

Chulg'amlardan nominal tok $I_{qt} = I_{1N}$ o'tgandagi qisqa tutashuv isroflari $P'_{qt.N}$ transformatorning ***muhim parametrlaridan biri*** hisoblanadi va uni quyidagi formula orqali hisoblash mumkin:

$$P'_{qt.N} \approx P_{e1} + P_{e2} = mI^2_{1.N}\, r_1 + m\,(I'_{2.N})^2 r_2 = m\, I^2_{qt.N}\, r_{qt}. \qquad (4.20)$$

Bu rejimdagi asosiy energiya isroflari tokning kvadrati (I^2_{qt}) ga mutanosib ravishda o'zgarganligi tufayli qisqa tutashuv quvvati P_{qt} ning o'zgarishi parabola shakliga yaqin bo'ladi.

$\cos\varphi_{qt} = f(U_{qt})$. Qisqa tutashuv tajribasida magnit zanjir to'yinmaganligi tufayli kuchlanishning aktiv va reaktiv tashkil etuvchilari nisbati o'zgarmas bo'ladi, ya'ni qisqa tutashuv kuchlanishlari to'g'ri burchakli uchburchak ABC ning katetlari bir xil nisbatda o'zgarib qisqa tutashuv kuchlanishi U_{qt} va toki I_{qt} vektorlari orasidagi siljish burchak j_{qt} o'zgarmas bo'ladi. Shu sababli quvvat koeffitsienti $\cos\varphi_{qt}$ qisqa tutashuv rejimida o'zgarmas ($\cos\varphi_{qt}$ =const) bo'lib, uni uch fazali transformatorlar uchun tajribadan olingan qisqa tutashuv



4.3-rasm. *Quvvati S_N = 100 кV·A; U_{1N} /U_{2N}= 6,3 /0,22 кV; chulg'amlari Y/Y ulangan, uch fazali ikki chulg'amli transformatorning qisqa tutashuv tajribasini sxemasi (**a**) va qisqa tutashuv xarakteristikalari (**b**); K.R — kuchlanishni rostlagich.*

ma'lumotlaridan foydalanib quyidagicha aniqlanadi:

$$\cos\varphi_{qt} = P_{qt} /(\sqrt{3})U_{qt}I_{qt}). \qquad (4.21)$$

Qisqa tutashuv tajribasidan olingan ma'lumotlar bo'yicha transformator almashtirish sxemasining parametrlari: to'la (Z_{qt}), aktiv (r_{qt}) va induktiv (x_{qt}) qarshiliklari quyidagicha aniqlanadi:

a) birlamchi chulg'ami «Y»sxemasiga ulangan uch fazali transformator uchun:

$$Z_{qt} = U_{qt} / (\sqrt{3}\, I_{qt}),\ r_{qt} = P_{qt} /(3I^2_{qt}),\ x_{qt} = \sqrt{Z_{qt}^2 - r_{qt}^2} \qquad (4.22)$$

b) birlamchi chulg'ami «Δ»sxemasiga ulangan uch fazali transformator uchun:

$$Z_{qt} = \sqrt{3}\, U_{qt} / I_{qt},\ r_{qt} = P_{qt} / I^2_{qt},\ x_{qt} = \sqrt{Z_{qt}^2 - r_{qt}^2}\ . \qquad (4.23)$$

Odatda birlamchi va keltirilgan ikkilamchi chulg'amlarning to'la (Z_1, Z'_2), aktiv (r_1, r'_2) va induktiv (x_1, x'_2) qarshiliklari taxminan quyidagiga teng:

$$\underline{Z}_1 \approx \underline{Z}'_2 \approx 0{,}5\ \underline{Z}_{qt}\ ;\ r_1 \approx r'_2 \approx r_{qt}/2;\ x_1 \approx x'_2 \approx x_{qt}/2\ , \qquad (4.24)$$

deb hisoblanadi.

Qisqa tutashuv kuchlanishi U_{qt}, uning aktiv ($U_{qt.a}$) va reaktiv ($U_{qt.r}$) tashkil etuvchilari nominal kuchlanishlarga nisbatan foizlarda quyidagicha aniqlanadi:

$$\begin{aligned} u_{qt(\%)} &= (I_N Z_{qt} / U_{1N}) \cdot 100, \\ u_{qt.a(\%)} &= (I_N r_{qt} / U_{1N}) \cdot 100, \\ u_{qt.r(\%)} &= (I_N x_{qt} / U_{1N}) \cdot 100. \end{aligned} \qquad (4.25)$$

Standartga binoan U_{qt} va $U_{qt.a}$ larni aniqlashda r_{qt} va $\underline{Z}_{qt}$ qarshiliklar A, E, C issiqqa chidamlilik klassdagi izolatsiyali transformatorlar uchun 75°C o'rta hisobiy temperaturaga quyidagicha keltiriladi:

$$r_{qt(75°)} = r_{qt}\,[1 + 0{,}004\,(75° - \vartheta)], \qquad (4.26)$$

bunda ϑ – chulg'am qarshiligini o'lchagan paytdagi temperatura.

Qisqa tutashuv kuchlanishi transformatorning ichki qarshiligini ifodalaydi va kuchlanish tushishi (ΔU)ga, qisqa tutashuv toki (I_{qt})ga va tashqi xarakteristikalariga ta'sir ko'rsatadi.

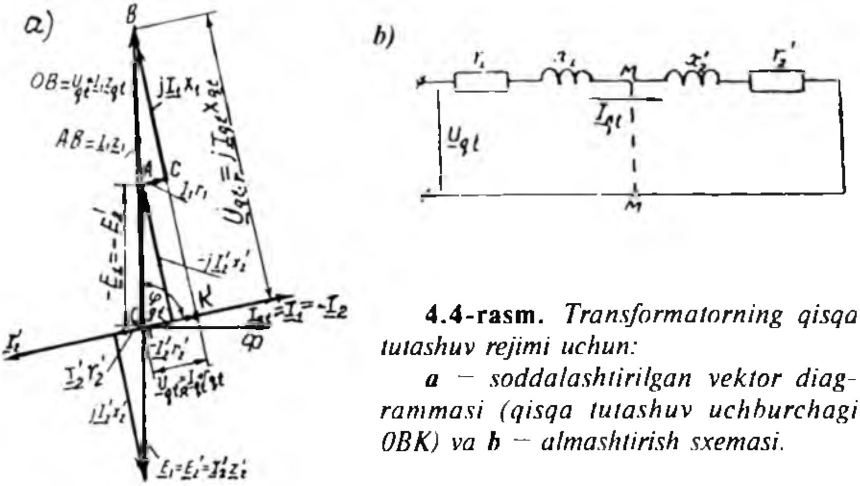
Transformatorning qisqa tutashuvdagi kuchlanish va EYK lar hamda toklar muvozanat tenglamalari quyidagicha yoziladi:

$$\left.\begin{aligned} \underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 + \underline{I}_{1qt}\,\underline{Z}_{1qt}; \\ 0 &= \underline{E}'_2 - \underline{I}'_{2qt}\,\underline{Z}'_{2qt}; \\ \underline{I}_{1qt} &= -\underline{I}'_{2qt}\,. \end{aligned}\right\} \qquad (4.27)$$

Aktiv, induktiv va to'la qarshiliklardagi kuchlanish pasayishlari vektorlari qisqa tutashuv uchburchagi (0BK) ni hosil qiladi (4.4,*a*-rasm).

Bu rejim uchun almashtirish sxema oddiy ko'rinishga ega bo'ladi, chunki qisqa tutashuvda berilayotgan kuchlanish U_{qt} uning nominal qiymatiga nisbatan juda ham kamligidan, (4.17) dagi transformator toklarining muvozanat tenglamasida magnitlovchi tok $I_m \approx I_0$ ni hisobga olmaslik mumkin. Bu holda transformatorning T-simon almashtirish sxemasida magnitlovchi zanjir va uning qarshiliklari (r_m va x_m) chiqarib tashlansa, qisqa tutashuv rejimi uchun almashtirish sxemasi kelib chiqadi (4.4,*b*-rasm).

Mazkur sxemada birlamchi va ikkilamchi chulg'am qarshiliklari ketma-ket ulangan bo'lib, ularni qisqa tutashuvdagi to'la qarshilik ($Z_{qt} = r_{qt} + jx_{qt}$) ko'rinishida ham ko'rsatsa bo'ladi. Transformatorning qisqa tutashuvdagi to'la qarshilik Z_{qt} ga ekvivalent ko'rinishida ifodalanishi amaliy hisoblarida keng qo'llaniladi.



4.4-rasm. *Transformatorning qisqa tutashuv rejimi uchun:*

***a** — soddalashtirilgan vektor diagrammasi (qisqa tutashuv uchburchagi OBK) va **b** — almashtirish sxemasi.*

Nazorat savollari:

1. Transformatorga ulangan yuklama o'zgarishining asosiy magnit oqimga ta'sirini Lens qoidasi orqali qanday tushuntiriladi?

2. Keltirilgan transformator nima va uning parametrlari real transformatornikidan nima bilan farq qiladi?

3. Yuklama ulangan transformatorning vektor diagrammalari qanday quriladi?

4. Qisqa tutashuv tajribasi nima maqsadda o'tkaziladi?

5-BOB. TRANSFORMATORNING EKSPLUATATSION XARAKTERISTIKALARI

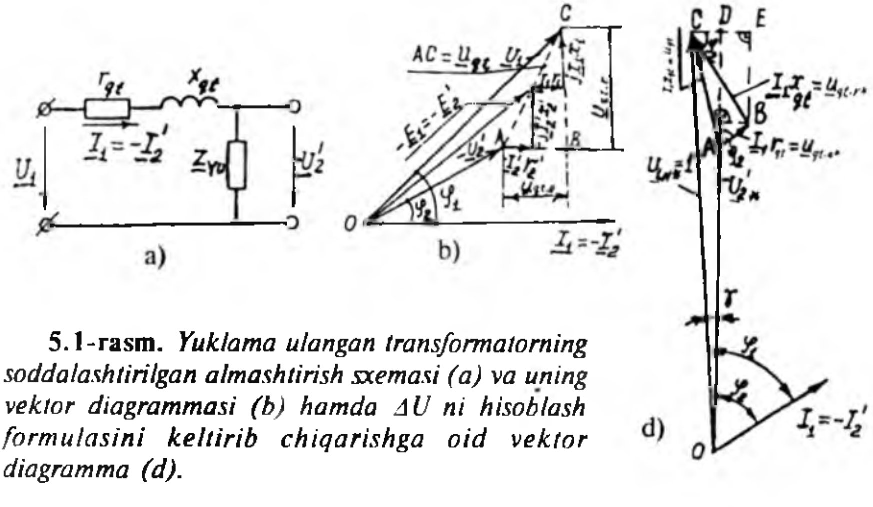
5.1. Transformatorning tashqi xarakteristikalari va kuchlanish o'zgarishi

5.1-rasmdagi vektor diagrammalar yuklama ulangan transformatorning barqaror rejimdagi ish jarayonini to'la aks ettiradi, lekin ular bo'yicha amalda taxminiy tekshirishlar uchun hisob o'tkazish qiyin. Shu sababli katta quvvatli transformatorlarda I_0 tokining juda ham kamligidan uni 0 ga tenglaganda toklarning muvozanat tenglamasi ($\underline{I}_1 \approx -\underline{I}'_2$) hamda yuklama ulangan transformatorning almashtirish sxemasi ancha sodda ko'rinishga ega bo'ladi

(5.1,*a*-rasm) va transformator ish jarayonini taxminiy hisoblashni ancha osonlashtiradi. Bunday holdagi vektor diagrammani *soddalashtirilgan vektor diagramma* deyiladi va u amalda keng foydalaniladi (5.1,*b*-rasm).

Aktiv-induktiv yuklama uchun qurilgan soddalashtirilgan vektor diarammani qurish uchun tok $\underline{I}_1 = -\underline{I}'_2$, kuchlanish $\underline{U}'_2$ va ular orasidagi burchak φ_2 hamda transformator chulg'amlarining qarshiliklari yoki qisqa tutashuv kuchlanishi u_{qt}, uning aktiv ($u_{qt.a}$) va reaktiv ($u_{qt.r}$) tashkil etuvchilari ma'lum bo'lishi lozim.

Transformatorda kuchlanish o'zgarishi. Transformatorning birlamchi



5.1-rasm. *Yuklama ulangan transformatorning soddalashtirilgan almashtirish sxemasi (a) va uning vektor diagrammasi (b) hamda ΔU ni hisoblash formulasini keltirib chiqarishga oid vektor diagramma (d).*

chulg'amiga berilgan kuchlanish $U_1=U_{1N}$=const va tok chastotasi ham $f=f_N$ = const bo'lganda salt ishlashidagi va yuklama tokining nominal qiymatidagi ikkilamchi chulg'am kuchlanishlari ayirmasiga transformator *kuchlanishining o'zgarishi* (ΔU) deyiladi. Umumiy maqsadli kuch transformatorlari asosan aktiv-induktiv yuklamada ishlagani tufayli, mazkur o'zgarish kuchlanish tushishi ko'rinishida namoyon bo'ladi. Bu kattalik transformatorni ishlatishda ***muhim xarakteristikalardan*** biridir.

ΔU ni aniqlash formulasi birlamchi chulg'amiga berilgan kuchlanishi $U_1=U_{1N}$ va ikkilamchi chulg'am toki $I'_2=I'_{2N}=I_{1N}$ bo'lgan hol uchun nisbiy birliklarda qurilgan soddalashtirilgan vektor diagramma (5.1,*b*-rasm)dan keltirib chiqariladi.

Ikkilamchi chulg'amda ΔU ning qiymati nominal kuchlanishga nisbatan foizlarda quyidagicha aniqlanadi:

$$\Delta \underline{U}_{N\,(\%)}=100\,(\underline{U}_{2.0}-\underline{U}'_2)\,/\,\underline{U}_{2.0}=100\,(\underline{U}_{1N}-\underline{U}'_2)\,/\,\underline{U}_{1N}\,, \quad (5.1)$$

bunda, $\underline{U}'_{2.0}=\underline{U}_{1N}$ – keltirilgan transformator uchun.

Odatda ΔU (5.1,*b*-rasmda – AD) qisqa tutashuv kuchlanishining aktiv $u_{q.t.a(\%)}$ va reaktiv $u_{q.t.r\,(\%)}$ tashkil etuvchilari orqali foizlarda hisoblanadi:

$$\Delta U_{\%}\approx u_{q.t.a\,(\%)}\cos\varphi_2+u_{q.t.r\,(\%)}\sin\varphi_2\,. \quad (5.2)$$

Bu formula bo'yicha yuklama nominal qiymatga teng bo'lgandagi kuchlanish tushishini aniqlash mumkin, yuklamaning ixtiyoriy qiymati uchun esa (5.2) ning o'ng tomonini yuklama koeffitsienti ($K_{yu}=I_2/I_{2N}$) ga ko'paytirish kerak, ya'ni

$$\Delta U_{\%}=K_{yu}\,(u_{q.t.a\,(\%)}\cos\varphi_2+u_{q.t.r\,(\%)}\sin\varphi_2). \quad (5.3)$$

Xulosa. (5.3) dan ko'rinishicha, ikkilamchi chulg'am kuchlanishining o'zgarishi yuklamaning qiymatiga va xarakteriga bog'liq bo'lar ekan (5.2-rasm).

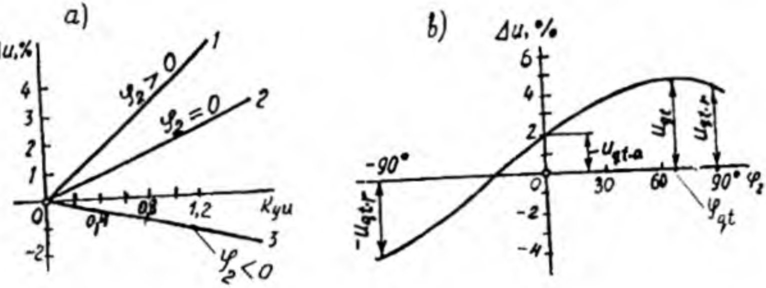
$\Delta U=u_{qt}$ ning eng katta o'zgarishi $\varphi_2=\varphi_{qt}$ burchakka to'g'ri keladi, chunki bunda

$$\cos(\varphi_{q.t}-\varphi_2)=1.$$

Kuchlanish o'zgarishi ΔU yuklamaning har xil xarakterida quyidagilarga teng bo'ladi:

1) sof aktiv ($\varphi_2=0$) yuklamada $\Delta U=u_{q.t.a}$;

2) sof induktiv va sig'imiy ($\varphi_2=\pm\,90°$) yuklamalarda esa $\Delta U=\pm\,u_{q.t.r}$.



5.2-rasm. *Uch fazali transformator (100 kVA, 6,3 / 0,22 kV, u_{q} = 5,4 %, cosφ_{qt} =0,4) ikkilamchi chulg'amida kuchlanish o'zgarishining:* ***a*** *– yuklama koeffitsientiga – $\Delta U = f(K_{yu})$*

*(**1** – aktiv-induktiv, **2** – aktiv va **3** – aktiv-sig'imiy yuklamalarga oid) va **b** – yuklama xarakteriga – $\Delta U = f(\varphi_2)$ bog'liq holda o'zgarishi.*

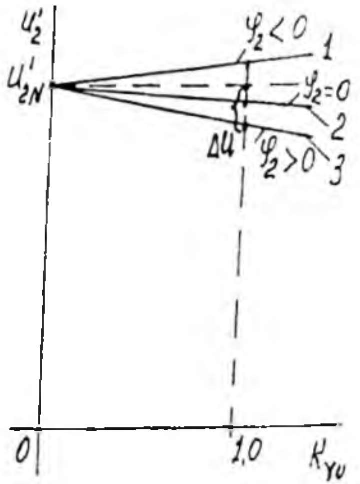
Transformatorning tashqi xarakteristikalari. Birlamchi chulg'amga berilgan kuchlanish $U_1 = U_{1N}$, tokning chastotasi $f = f_N$ va yuklamaning quvvat koeffitsienti cosφ_2 o'zgarmagan holda transformatorning ikkilamchi kuchlanishi U_2 ning shu chulg'amdan o'tadigan yuklama toki I_2 ga yoki yuklama koeffitsienti K_{yu} ga bog'liqligi $U'_2 = f(K_{yu})$ – *transformatorning tashqi xarakteristikasi* deyiladi (5.3-rasm). Transformatorning birlamchi chulg'amiga nominal kuchlanish berib ikkilamchi chulg'amiga yuklama ulanmagan ($I_2 = 0$) holdagi kuchlanish uning EYK ga teng ($E_{2.0} = U_{2N}$) bo'ladi va uni *ikkilamchi chulg'am nominal kuchlanishi* deb qabul qilinadi.

Yuklama ulanganda ikkilamchi chulg'amdan tok o'tib Lens qoidasiga binoan birlamchi chulg'amdagi tok ham oshadi. Bu toklar chulg'amlarning aktiv va induktiv qarshiliklarida kuchlanish pasayishlarini vujudga keltiradi.

Soddalashtirilgan almashtirish sxemaga binoan yozilgan

$$-\underline{U}'_2 = \underline{U}_1 - \underline{I}_1\underline{Z}_1 \qquad (5.4)$$

muvozanat tenglamadan hamda aktiv-induktiv va aktiv-sig'imiy xarakterli yuklamalar uchun qurilgan vektor diagrammalardan (4.1-rasm) ko'rinishicha *ikkilamchi chulg'am kuchlanishining o'zgarishiga yuklamaning qiymati va xarakteri ta'sir qiladi*, ya'ni aktiv-induktiv yuklamada tok I'_2 ning oshishi bilan kuchlanish U'_2 nisbatan kamayishi (5.3-rasm), katta sig'imli aktiv-sig'imiy yuklamada esa biroz oshishi mumkin.



5.3-rasm. *Transformatorning tashqi xarakteristikalari: 1 — aktiv-sig'imiy; 2 — aktiv; 3 — aktiv-induktiv yuklamalar uchun.*

5.2. Transformatorlarda kuchlanishni rostlash usullari va vositalari

Transformatorlarning ish jarayonida ikkilamchi chulg'am kuchlanishini rostlash zarurati quyidagilarga binoan vujudga keladi.

1. Elektr uzatish liniyasidagi kuchlanishning pasayishidan vujudga keladigan holda birlamchi kuchlanish qiymatini kam (5÷10%) miqdorda o'zgartirib, ikkilamchi kuchlanish U_2 ning qiymatini o'zgartirmay (U_2= const) turish.

2. Birlamchi kuchlanish U_1= const bo'lganda ikkilamchi kuchlanish U_2 ning qiymatini keng ko'lamda rostlash.

Bu ikkala holda ham ikkilamchi chulg'am kuchlanishi U_2 transformatsiyalash koeffitsienti "*k* " ni o'zgartirish yo'li bilan rostlanadi.

1-holda U_2 ni rostlash uchun birlamchi chulg'amning o'ramlar soni w_1 ni yoki ikkilamchi chulg'am o'ramlar soni w_2 ni o'zgartirish mumkin.

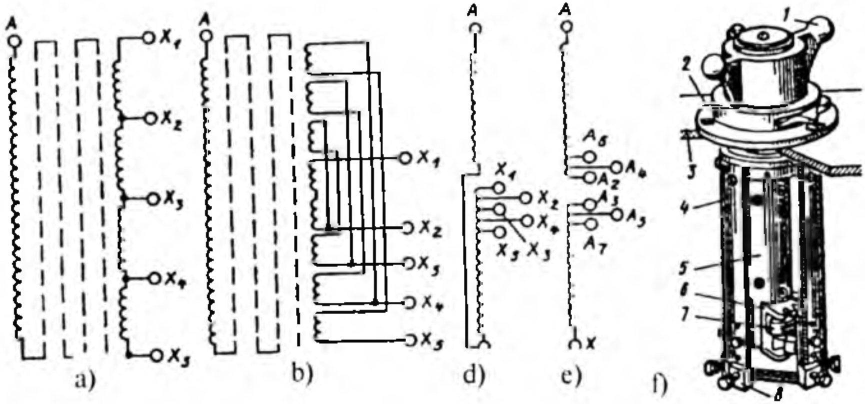
Masalan, tarmoq kuchlanishini pasaytiruvchi transformatorlarda U_1 pasayganda w_1 ni mos ravishda shunday kamaytirish kerakki, bunda bitta o'ramga to'g'ri kelgan EYK $E_0 = E_1 / w_1 \approx U_1 / w_1$ = const bo'lishi, ya'ni o'zgarmay qolishi kerak. Bunda w_2 o'zgarmaganligidan ikkilamchi chulg'am EYK ham o'zgarmaydi va, shu sababli birlamchi kuchlanish U_1 oshsa, mos ravishda w_1 ni oshirish zarur bo'ladi.

2-holda, ya'ni U_1= const bo'lganda ikkilamchi chulg'am kuchlanishi U_2 ni rostlash uchun $w_2 = w_{YK}$ ni o'zgartiradilar. Bu holda w_1 ni o'zgartirish mumkin emas, chunki bunda transformator magnit oqimi F ning qiymati o'zgarib, zararli hol vujudga keladi.

Kuchlanishni rostlash vositalarining quyidagi turlari mavjud:

1. *Transformatorni tarmoqdan uzib* birlamchi va ikkilamchi chulg'amlarning rostlash uchun mo'ljallangan shoxobcha pog'onasini o'zgartirish yo'li bilan kuchlanishni rostlash (MDH hududida buni qisqacha "PBV – переключение без возбуждения" deb yuritiladi). Buning qayta ulagichi 5.4-rasmda ko'rsatilgan.

2. *Transformatorni tarmoqdan uzmay* uning kuchlanishini rostlash. Buni MDH hududida qisqacha "RPN (регулирование под нагрузкой)" deyiladi.



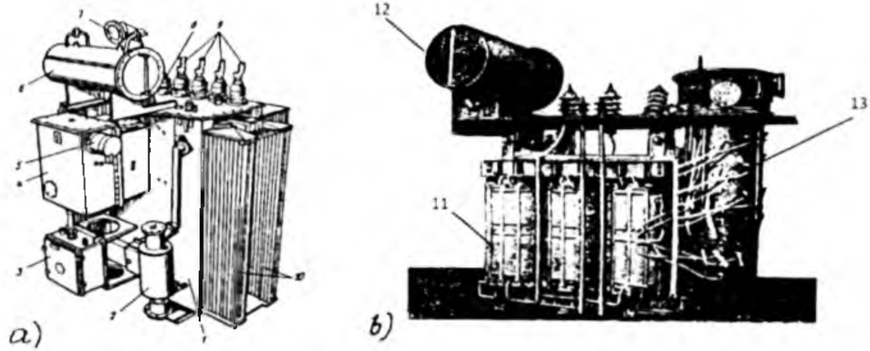
5.4-rasm. *Yuqori kuchlanishli chulg'amda kuchlanishni rostlashning PBV turida shoxobchalarni bajarish sxemalari: **a, b** – ko'p qatlamli silindrik chulg'amlar uchun; **d, e** – ko'p qatlamli g'altakli silindrik va uzluksiz g'altakli chulg'amlar uchun; **f** – uch fazali qayta ulagich, bunda: **1** – yuritish dastagi; **2** – mahkamlash flanetsi; **3** – bak qopqog'i; **4** – qog'oz-bakelitli silindr; **5** – tayanch valning qog'oz-bakelitli izolatsiyasi; **6** – tirsakli val; **7, 8** – qo'zg'aluvchi va qo'zg'almas kontaktlar.*

Chulg'am o'ramlari sonini o'zgartirish kontaktli qayta ulagich yordamida amalga oshiriladi. U bakning ichiga joylashtiriladi, boshqariladigan qismi esa PBV turida bak qopqog'iga chiqarilgan

bo'ladi. RPN turida qayta ulagich maxsus yuritma yordamida boshqariladi.

PBV turida umumiy maqsadli katta quvvatli kuch transformatorining YK chulg'am tomonida 5 ta (+5, +2,5, 0, −,5, −5 %) rostlash pog'onasi bo'lib, bunda kuchlanish nominal qiymatiga nisbatan ± 5 % ga rostlanadi.

Kuchlanishning YK chulg'am tomonida rostlanishiga sabab shuki, bu holda YK chulg'amda past kuchlanishliga nisbatan tok ancha kam bo'lib, kontaktlarning ishi yengillashadi, ya'ni ularning xizmat muddati oshadi.



5.5-rasm. *Kuchlanishi RPN usulida rostlanadigan kuch transformatorlari:*

a) quvvati 2500 kV·A bo'lgan bir fazali (1 − bak; 2 − termosifonli filtr; 3 − rostlash qurilmasini yuritish mexanizmi; 4 − kontaktorlar joylashtirilgan bak; 5 − mufta; 6 − kengaytirgich; 7 − saqlovchi truba; 8, 9 − tegishlicha PK va YK o'q o'tkazgichli izolatorlar; 10 − radiatorlar); b) quvvati 1000 kV·A, kuchlanishi esa 35 kV bo'lgan uch fazali (11 − chulg'am; 12 − kengaytirgich; 13 − rostlanuvchi shoxobchalarni qayta ulagich qurilmasi).

Ko'pchilik hollarda "yulduz" sxemasi bo'yicha ulangan har bitta faza chulg'amining "nol" nuqtasida bajariladi. 5.4,*a*-rasmdagi sxema quvvati 160 kV·A gacha bo'lgan transformatorlarda, quvvati 250 kV·A va undan katta bo'lgan holda 54.4,*b*-rasmdagi sxema qo'llaniladi. 5.4,*c*-rasmdagi sxema nominal kuchlanishi 38,5 kV bo'lgan chulg'amlar uchun, 5.4,*d*-rasmdagi sxema esa chulg'amning kuchlanishi 220 kV

gacha bo'lgan transformatorlar uchun bajariladi va chulg'amni o'rashda uning bitta yarmi o'ng o'ralsa, ikkinchi yarmi chap o'raladi.

Kuchlanishni rostlashning RPN turida iste'molchini energiya bilan ta'minlashning uzilmasligi, uning PBV turiga nisbatan katta afzalligidir, lekin RPN turidagi qayta ulagichning murakkabligi va, shu bilan birga, *tannarxining qimmatligi uning kamchiligidir.* Quvvati 400÷630000 kV·A bo'lgan zamonaviy transformatorlarda ishlatiladigan kuchlanishni rostlashning RPN turida rostlanishi ±(10÷16) foizlarda amalga oshiriladi.

RPN bilan ta'minlangan bir fazali kuch transformatorining tashqi ko'rinishi va uch fazalining aktiv qismi 5.5-rasmda ko'rsatilgan.

Nazorat savollari:

1. Transformatorning tashqi xarakteristikalarini tahlil qiling.
2. Kuchlanish tushishi ΔU qanday hisoblanadi?
3. Transformatorning kuchlanishi qanday usullar bilan rostlanadi?

6-BOB. TRANSFORMATOR CHULG'AMLARINING ULANISH GURUHLARI VA TRANSFORMATORLARNING PARALLEL ISHLASHI

6.1. Transformator chulg'amlarining ulanish guruhlarini aniqlash

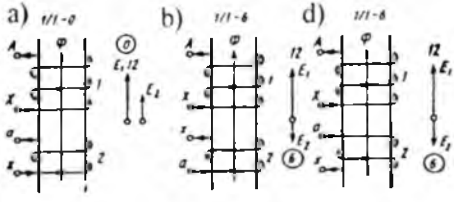
6.1-rasmda bir fazali transformatorning bitta o'zagida joylashtirilgan ikkita (1 va 2) chulg'amni bir xil magnit oqim (Φ) kuch chiziqlari tomonidan kesib o'tayotgan hol ko'rsatilgan. Agar chulg'amlarning o'ralish yo'nalishi va uchlarining belgilanishi bir xil bo'lsa (6.1,*a*-rasm), ularda hosil bo'lgan EYK lar (masalan, tekshirilayotgan payt uchun chulg'amning oxiridan boshiga) bir xil yo'nalgan bo'ladi va, demak, faza bo'yicha mos tushadi.

Agar shu chulg'amlardan bittasida, masalan, PK (2) chulg'am uchlarining belgilanishi almashtirilsa, undagi hosil bo'lgan EYK ning chulg'am uchlariga nisbatan yo'nalishi teskariga o'zgaradi, ya'ni bu holda "*a*" dan "x" ga yo'nalgan bo'lib, YK va PK chulg'amlar EYK lari E_1 va E_2 faza bo'yicha 180° ga siljigan bo'ladi.

Chulg'am uchlarini o'zgartirmasdan bironta (masalan, PK) chulg'amning o'ralish yo'nalishini o'zgartirganda ham E_1 va E_2 EYK larning o'zaro siljish fazasi 180° bo'ladi. Shunday qilib, YK va PK fazaviy chulg'amlar EYK lari orasidagi faza siljishi shu chulg'amlar uchlarining belgilanishiga hamda o'ralish yo'nalishiga bog'liq bo'ladi. Mazkur chulg'amlar bitta o'zakda joylashtirilganda bu siljish 0 yoki 180° ga teng bo'lishi mumkin.

Uch fazali transformatorlarda chulg'amlarning ulanish guruhlari YK va PK chulg'amlarga tegishli bir xil liniyaviy kuchlanishlari vektorlarining o'zaro siljish burchagini ifodalaydi.

Chulg'amlarning ulanish guruhini odatdagi (siferblatli, ya'ni doirachada 1÷12 raqamlar ko'rsatilgan) soatdan foydalanib aniqlash usuli amalda o'ng'ay hisoblanadi (***bu usul standartda ham belgilangan***).



6.1-rasm. *Bir fazali transformator chulg'amlarining ulanish guruhini aniqlashga oid chizmalar.*

Buning uchun, dastavval, soatni tasvirlovchi doira chizilib, uning raqamlari aylanaga teng taqsimlab belgilanadi.

Uch fazali transformatorning ulanish guruhi YK va PK chulg'amlarning liniyaviy EYK vektorlari orqali aniqlanganligidan doiraga YK chulg'am uchun EYK lar vektor diagrammasi chiziladi.

Buni quyidagi sxemalar uchun ko'rib chiqamiz:

1. *Transformatorning chulg'amlari Y/Y sxemaga ulanganda* YK chulg'am fazaviy EYK larining vektor diagrammasi bir-biridan faza jihatdan 120° siljigan uchta bir xil vektordan iborat bo'lib, ularning uchlari o'zaro to'g'ri chiziqlar bilan ulanganda tomonlari liniyaviy (fazalararo) kuchlanishni beradigan teng tomonli uchburchak hosil bo'ladi.

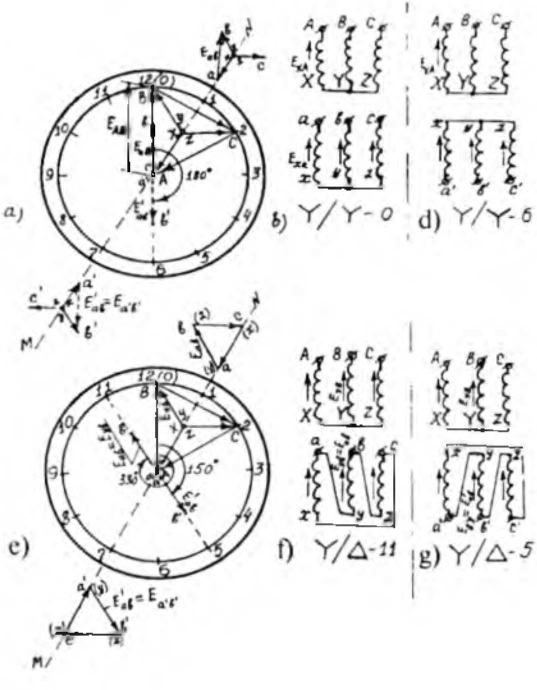
Uchburchakning bitta (masalan, AB) tomoni YK chulg'amning liniyaviy EYK vektoriga modul jihatdan teng (AB= E_{AB}) va soatning "12" raqamiga doimiy ravishda yo'naltirilgan bo'lishi kerak. Shu sababli YK chulg'amining vektor diagrammasiga oid uchburchakni doiraning markazidan "12" raqamga yo'naltirilgan AB radiusni chizishdan boshlanadi (6.2,*a*-rasm). Shu uchburchakka oid boshqa ikki tomonining holatini aniqlash uchun uzunligi AB radiusga teng bo'lgan BC vatarni B nuqtadan o'tkazamiz. A, B va C nuqtalarni o'zaro to'g'ri chiziqlar bilan birlashtirib, teng tomonli uchburchak hosil qilinadi. Bu uchburchak medianalarining kesishgan nuqtasidan uning uchlarigacha bo'lgan oraliq (chizmada vektor) YK chulg'am fazaviy EYK larni beradi.

YK chulg'am uchun aniqlangan fazaviy EYK vektorlari transformatorning PK chulg'ami uchun vektor diagrammani qurishda zarur bo'ladi. Bunda YK va PK chulg'amlarning o'ralish yo'nalishi hamda fazaviy chulg'amlarning boshi va oxirlarining belgilanishi bir xil bo'lganida bir o'zakka joylashtirilgan chulg'amlarni bitta faza magnit oqimining kuch chiziqlari kesib o'tganligi tufayli chulg'amlarning EYK lari fazaviy chulg'amlarining oxiridan boshiga bir xil (musbat) yo'nalgan holati tekshiriladi.

Ikkilamchi chulg'am liniyaviy EYK vektori E_{ab} (bir fazali transformatorda fazaviy EYK vektori E_{xa}) YK chulg'amning liniyaviy EYK vektori E_{AB} ga (bir fazali uchun fazaviy EYK vektori E_{XA} ga) nisbatan 0 dan 360° oralig'ida burchaklarga siljigani uchun 360° ni 12 ga bo'lgandan chiqqan natija ***(30°) ulanish guruhining birligi qilib qabul qilinadi***. "Yulduz" sxemasiga ulangan PK chulg'am EYK lari vektor diagrammasini qurish uchun YK chulg'amning A fazaviy

chulg'am EYK vektori E_{XA} bilan mos tushadigan yo'nalishda yordamchi MN punktir chiziq chiziladi (6.2-rasm) va uning doiradan yuqori qismida birorta nuqtani belgilab, shu nuqtadan PK chulg'amning fazaviy EYK vektorlari (E_{xa} va E_{yb}) ni YK chulg'am "A" va "B" fazalarining tegishli EYK vektorlari (E_{XA} va E_{YB}) ga mos ravishda yo'naltiriladi. Ularning uchlarini birlashtirib, liniyaviy EYK vektori E_{ab} hosil qilinadi. Guruhni aniqlash uchun shu vektorning yo'nalishini aniqlash kifoya bo'ladi.

PK chulg'am liniyaviy EYK vektori E_{ab} ning YK chulg'am liniyaviy EYK vektori E_{AB} ga nisbatan siljishini aniqlash maqsadida PK chulg'am uchun qurilgan vektor diagrammaning E_{ab} vektorini o'ziga parallel ravishda doiraning ichidagi YK chulg'am vektor diagrammasi tomon siljitishda uning "*a*" nuqtasi E_{AB} vektorning "A" nuqtasi ustiga tushishi zarur.



6.2-расм. *«Yulduz-yulduz» (**b, d**) va «yulduz-uchburchak» (**f, g**) sxemalar uchun uch fazali transformator chulg'amlarining ulanish guruhini aniqlashga oid chizmalar (**a, e**).*

E_{XA} va E_{xa} fazaviy EYK vektorlar MN chizig'i ustida yotganligidan "a" nuqtani "A" nuqta tomon surishda juda ham qulaylik yaratadi.

Chulg'amlar Y/Y ulangan hol uchun qurilgan vektor diagrammalar shu tartibda birlashtirilganda PK chulg'amning liniyaviy EYK vektori E_{ab} YK chulg'amning liniyaviy EYK vektori E_{AB} bilan ustma-ust tushadi. Ularning orasidagi siljish burchagi 0 bo'lgani uchun chulg'amlarning ulanish guruhi 0 (0 : 30°= 0) bo'ladi (mazkur usuldagi sanoq sistemasi 0 dan boshlanishi uchun "12" ni "0" bilan almashtirish tavsiya qilinadi). Uch fazaii transformatorning ulanish guruhini soat yordamida aniqlash usulida PK chulg'am liniyaviy EYK vektori (E_{ab}) soatning kichik mili bilan belgilanadi va chulg'amning ulanish guruhlariga qarab, soatning bu mili 12 (0) dan 11 gacha bo'lgan turli butun sonlarni ko'rsatishi mumkin (6.2-rasm).

2. *Transformatorning YK chulg'ami "yulduz", PK chulg'ami esa "uchburchak" sxemasi* (6.2,f-rasm) *bo'yicha ulanganda* YK chulg'amida o'zgarish bo'lmagani tufayli bu chulg'am uchun vektor diagramma 6.2,*a*-rasmdagi bilan bir xil bo'ladi (6.2,*e*-rasm).

Chulg'amlari bir xil yo'nalishda o'ralgan, fazaviy chulg'amlari uchlarining belgilanishi va bu chulg'amlardagi EYK larning yo'nalishlari ham bir xil bo'lgan PK chulg'amda liniyaviy EYK E_{ab} miqdor jihatdan shu chulg'am fazaviy EYK E_{ub} ga teng ($E_{ab}= E_{uh}$), teskari ketma-ketlikda ulab "uchburchak" sxemasi hosil qilinganda esa $E_{ab}' =E_{hu}'$ bo'ladi).

6.2,*e*-rasmdagi *PK chulg'am uchun vektor diagrammani qurishda* yordamchi MN chizig'ining doiradan yuqori qismida bironta nuqtadan YK chulg'amning "B" fazaviy EYK vektori E_{YB} ga parallel qilib, unga mos yo'nalishda $E_{ab} =E_{uv}$ vektori chiziladi. Boshqa fazalarga oid EYK vektorlarni ham shunday tartibda chizish mumkin. So'ngra PK chulg'am liniyaviy EYK vektori E_{ab} ni o'ziga parallel qilib, uning "a" nuqtasi YK chulg'am liniyaviy EYK vektori E_{AB} ning MN chizig'i ustidagi A nuqtasi bilan ustma-ust tushgunga qadar siljitiladi. Bu holda E_{ab} vektor soatning "11" raqamiga yo'nalgan holatni egallaydi. Demak, transformator chulg'amlarining ulanish guruhi 11 ekan. E_{AB} vektoridan boshlab soat milining aylanishi bo'yicha burchakni o'lchab, uni 30° ga bo'lganda ham shu natija (330° : 30° = 11) olinadi.

Amaliyot uchun muhim xulosa. Transformatorlarning ulanish guruhi faqatgina PK chulg'amning YK chulg'amga nisbatan o'ralish yo'nalishiga, PK fazaviy chulg'amlarning uchlari qanday belgilanishiga

hamda ularning ulanish sxemalariga bog'liq bo'lib qolmasdan, YK va PK fazaviy chulg'amlarni qanday ketma-ketlikda ulab «Δ» sxemasini hosil qilishga ham bog'liq bo'ladi.

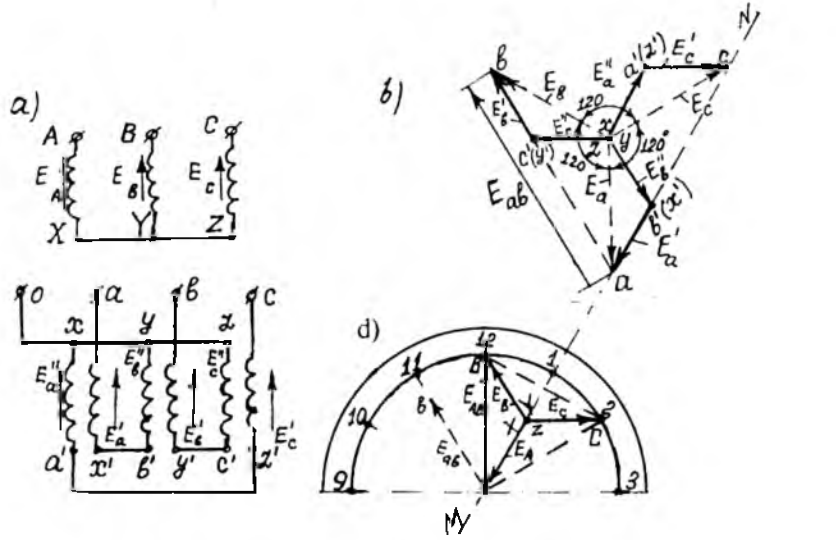
3. Chulg'amlarining o'ralish yo'nalishi va uchlarining belgilanishi bir xil bo'lib ***Y/Z sxema bo'yicha ulangan*** (6.3,*a*-rasm) transformatorning PK chulg'am EYK lari vektor diagrammasini (6.3,*b*-rasm) qurish uchun "A" fazaning ("*a*-x'") va B fazaning ("b'-y") g'altaklari o'zaro qarshi ulanganligi tufayli ularda hosil bo'ladigan EYK lar bir-biridan 120° siljigan hamda EYK lari teskari yo'nalganligidan ularni geometrik ayirish natijasida fazaviy EYK vektorlari (E_a, E_b, E_c) hosil qilinadi, ya'ni: $E_a = E''_b - E'_a$, $E_b = E''_c - E'_b$, $E_c = E''_a - E'_c$ (6.3,b-rasm). "B" fazaning ikkinchi ("b'-u") g'altagida hosil bo'ladigan EYK E''_b neytralga yo'nalgan, shu fazaga tegishli YK chulg'am EYK E_b esa neytraldan chulg'am boshiga yo'nalgan. Shu sababli E''_b vektorini E_b ga teskari yo'nalishda qo'yiladi va uning uchidan "A" fazaning PK chulg'amiga tegishli birinchi ("*a*-x'") g'altagi EYK vektori E_A ni YK chulg'amning "A" fazaviy EYK vektori E'_a ga mos yo'naltirib chiziladi. So'ngra E'_a vektorining uchini neytral nuqta bilan birlashtirib fazaviy EYK vektori E_a hosil qilinadi. "B" va "C" fazaviy chulg'amlarning tegishlicha EYK vektorlari E_b va E_c lar ham xuddi shu tartibda hosil qilinadi (6.3,b-rasm). E_a va E_b vektorlarning uchlarini birlashtirib E_{ab} vektorining yo'nalishi va kattaligini aniqlaymiz.

Bu vektorni o'ziga parallel ravishda YK chulg'am uchun qurilgan vektor diagrammaning "A" nuqtasiga liniyaviy vektor E_{ab} ning "*a*" nuqtasi ustma-ust tushadigan qilib ko'chirilganda E_{ab} vektori soatning "11" raqamiga yo'nalganligi kuzatiladi (6.3,d-rasm). Demak, berilgan sxema uchun chulg'amlarning ulanish guruhi "11" ekan.

6.2. Uch fazali transformator chulg'amlarining ulanish guruhlarini tajriba yo'li bilan aniqlash va ularning qo'llanish sohalari

1. Ulanish guruhlarini tajriba yo'li bilan aniqlash usullari.

1. Fazometr usuli. Bu usul YK va PK chulg'amining mos liniyaviy kuchlanishlari (yoki EYK lari) orasidagi faza siljish burchagini fazometr (φ) yordamida bevosita o'lchashga asoslangan (6.4,*a*-rasm). Fazometrning parallel chulg'ami (U-U)ni transformatorning YK tomoniga, ketma-ket chulg'ami (I-I)ni esa PK tomoniga ulanadi.



6.3-rasm. *«Yulduz-zigzag» sxemasi (**a**) uchun kuch transformatorlarining ulanish guruhini aniqlashga oid vektor diagrammalar (**b, d**)* .

Ketma-ket chulg'amidagi tokni cheklash uchun uni qo'shimcha qarshilik $r_{qo'sh}$ orqali ulanadi. So'ngra transformatorning YK chulg'ami uch fazali simmetrik kuchlanishli elektr tarmog'iga ulanadi. Shuni ta'kidlash lozimki, o'lchash qulay bo'lsin uchun fazometrning shkalasi 360° gacha bo'lgani maqsadga muvofiq hisoblanadi.

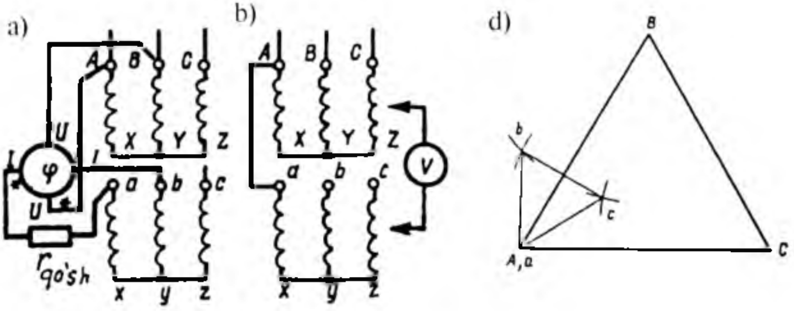
2. Voltmetr usuli. Bu usulda chulg'amlarning liniyaviy kuchlanishlari (yoki EYK lari) orasidagi siljish burchagi o'lchanmaydi.

Demak, u bilvosita usul bo'lib, YK va PK chulg'amlarning bir xil nomli uchlariaro kuchlanish (yoki EYK) larni o'lchashga asoslangan. Agar Y/Y-0 (6.4,*b*-rasm) ulanish guruhi tekshirilsa YK va PK chulg'amlarning "A" va "a" uchlarini sim bilan ulab U_{Bb} va U_{Cc} kuchlanishlar o'lchanadi. O'lchangan kuchlanishlar quyidagi:

$$U_{Bb} = U_{Cc} = U_{ab}\,(k_l - 1) \qquad (6.1)$$

tenglamani qanoatlantirsa (bunda $k_l = U_{AB}/U_{ab}$ – liniyaviy kuchlanishlarni transformatsiyalash koeffitsienti), ulanish guruhi Y/Y- 0 ga mos keladi.

Boshqa guruhlar uchun esa quyidagi tenglamalar bo'yicha tekshiriladi:



6.4-rasm. *Transformatorning ulanish guruhini tajriba yo'li bilan fazometr (**a**) va voltmetr (**b**) usullarida aniqlash sxemalari; **d** – tajribaviy-grafik usuli uchun diagramma qurish.*

Y/Y – 6 guruh uchun – $U_{Bb} = U_{Cc} = U'_{ab}{}' (k_l + 1)$, (6.2)

Y/D – 11 guruh uchun – $U_{Bb} = U_{Cc} =$

$$=U_{ab}\sqrt{1-\sqrt{3}+\kappa_l+\kappa_l^2}\ , \qquad (6.3)$$

Y/D – 5 guruh uchun – $U_{Bb} = U_{Cc} =$

$$= U'_{av}{}'\sqrt{1+\sqrt{3}+\kappa_l+\kappa_l^2}\ , \qquad (6.4)$$

(6.2÷6.4) tenglamalarda U_{ab} va $U'_{av}{}'$ – PK chulg'am liniyaviy kuchlanishlari.

Agar o'lchangan kuchlanishlar keltirilgan formulalarni qanoatlantirmasa, demak, transformator chulg'amlarining uchlari noto'g'ri belgilangan bo'ladi.

3. Tajribaviy-grafik usuli. Transformatorning ulanish guruhini bu usulda aniqlash uchun Y/Δ sxemaga ulangan YK va PK chulg'amlarning bir xil nomli (masalan, "A" va "*a*") qisqichlarini o'zaro birlashtirib, transformatorning YK chulg'amini simmetrik uch fazali kuchlanish manbasiga qo'shiladi va liniyaviy hamda U_{Bb}, U_{Cc}, U_{Cb} va U_{Bc} kuchlanishlari o'lchanadi.

Olingan natijalar bo'yicha tanlangan masshtabda YK chulg'amning liniyaviy kuchlanishlar teng tomonli uchburchagi ABC quriladi (6.4,d-rasm). Bu uchburchakning B va C nuqtalaridan sirkul bilan U_{Bb} va U_{Cb} radiuslarida 2 ta yoy chizilsa kesishgan nuqtalari ularning PK chulg'am liniyaviy kuchlanishlari uchburchagining "b" uchini hosil

qiladi. Agar U_{Cc} va U_{bc} radiuslarida yoylar chizilsa, izlanayotgan uchburchakning «c» uchini beradi.

Sxemada "A" va "*a*" uchlar o'zaro ulanganligidan ularning potensiallari bir xil bo'ladi. Aniqlangan "*a*", "*b*", "c" nuqtalarni birlashtirib, PK chulg'am liniyaviy kuchlanishlar uchburchagi «*ab*c» ni hosil qilamiz.

Agar yuqorida belgilangan qoidaga binoan YK chulg'am liniyaviy kuchlanishlar uchburchagining AB tomoni soatning 12 raqamiga yo'naltirilsa, PK chulg'am liniyaviy kuchlanishlar uchburchagining "*ab*" tomoni ulanish guruhini aniqlaydi.

2. Transformator chulg'amlari ulanish guruhlarining qo'llanish sohalari.

1. Y/Y_0−0. YK chulg'ami "yulduz", PK chulg'ami esa neytral (0) simi tashqariga chiqarilgan "yulduz" sxemasiga ulangan 0-guruhli quvvati katta bo'lmagan, kuchlanishi esa 10 / 0,4 yoki 6 / 0,4 bo'lgan transformatorlar elektr iste'molchilari yorug'lik va kuch elektr jihozlaridan iborat bo'lgan aralash yuklamalar uchun ishlatiladi. Bunda elektr motorlari liniyaviy kuchlanishlarga, yorug'lik va uy xo'jaligida hamda maishiy xizmat korxonalaridagi elektr asboblar asosan faza kuchlanishlariga ulanadi. Bu sxemani Δ / **Y − 11** guruhli ulanish sxemasi bilan almashtirish mumkin. Transformatorning chulg'amlari bu sxemaga ulanganda fazalarining yuklamasi nosimmetrik bo'lganda ham nisbatan yaxshi ishlaydi. Bu esa *mazkur ulanish guruhining afzalligidir*.

2. Y / Δ −11. YK chulg'ami "yulduz", PK chulg'ami esa "uchburchak" sxemasiga ulangan 11-guruhli transformatorlar past kuchlanishi 400 V dan katta bo'lgan (6 / 0,525; 10/ 0,525; 35/ 10; 35/ 6 kV) hollarda ishlatiladi.

3. Y_0 /Δ − 11. YK chulg'ami neytral (0) simi tashqariga chiqarilgan "yulduz", PK chulg'ami esa "uchburchak" sxemasiga ulangan 11-guruhli transformatorlar $U_{YK} \leq 110$ kV bo'lgan kuchlanishlarda ishlatiladi.

Chulg'amni "yulduz" (Y) sxemaga ulash yuqori kuchlanishlarda qulaydir, chunki chulg'amga beriladigan fazaviy kuchlanish (U_f) liniyaviy kuchlanish (U) dan $\sqrt{3}$ marta kichik bo'ladi. Bu esa *chulg'amni tayyorlashda izolatsion material kamroq sarflanib, transformatorning tannarxi kamayadi*.

PK chulg'amlarni ko'pchilik hollarda "Δ" sxemasiga ulaydilar.

Bunday sxemada transformator fazalaridagi yuklama notekis bo'lsa ham yaxshi ishlaydi. Undan tashqari "Δ"ka ulanganda chulg'amning fazaviy toki $I_f = I / \sqrt{3}$, ya'ni kam bo'lib, chulg'am o'rov simining kesim yuzasini kamroq tanlashga imkon beradi. Demak, *bu holda ham chulg'am tannarxi nisbatan arzon bo'ladi.*

Y/Y — 0 ulanish guruhida magnit oqimining asosiy tashkil etuvchisi $F_{(1)}$ dan tashqari uning 3-garmonikasi $F_{(3)}$ ham vujudga keladi. Transformatorning konstruktiv elementlarida $F_{(3)}$ hosil qilgan uyurma toklar uni me'yordan ortiqcha qizdirib yuboradi. Shu sabablarga (kamchiliklarga) ko'ra Y/Y— 0 sxema kam qo'llaniladi.

Sanoat ehtiyojlariga ko'ra Y/Y — 0; Δ/Y —11; Y/Δ —11; Y_0 /Δ —11 hamda maxsus buyurtmalar asosida Y / Z —11 ulanish guruhlari tayyorlanadi. Bulardan Y/Δ yoki Δ/Y sxemaga oid ulanish guruhi afzal hisoblanadi. Shu sababli standart Δ/Y — 11 ulanish guruhini tavsiya qilgan.

Transformator chulg'amlarining ulanish guruhlariga oid amaliyot uchun muhim bo'lgan xulosalar

1. Bir fazali transformatorda faqat 0 va 6-guruhlarni olish mumkin. Bir fazali ikki chulg'amli transformatorlar standart bo'yicha faqat I / I - 0 ulanish guruhiga moslab tayyorlanadi.

2. Chulg'am fazalarining bak qopqog'idagi standart bo'yicha belgilanish ketma-ketligi ("A-B-C" va "*a*-b-c") o'zgartirilmaganda Y / Y — 0 sxemasi 0 yoki 6-juft guruhlarni beradi.

3. Moyli transformator chulg'amlarining bak ichida ulangan Y / Y — 0 sxemasini o'zgartirmagan holda PK fazaviy chulg'amlarning uchlarini chapdan o'ngga ("*a*-b-c"; "c-*a*-b; "b-c-*a*") siljitib belgilash natijasida 0-guruhdan 4 va 8-guruhlarni hosil qilish mumkin. (***Izoh***: har bitta siljitib belgilashda bir xil nomlangan EYK 120°= 4×30° burchakka buriladi, demak, guruhning nomeri ham to'rttaga o'zgaradi).

4. Y / Y - 6 ulanish sxemasiga o'tish uchun transformator baki ichidagi nol hosil qilingan simni fazaviy chulg'amlarning boshiga ko'chirish zarur bo'ladi (bu holda PK chulg'amning barcha EYK lari YK chulg'am EYK lariga nisbatan teskari, ya'ni 180° yo'naladi).

5. Y / Y -6 ulanish sxemasida chapdan o'ngga siljitib belgilash natijasida 6-guruhdan 10 va 2-guruhlarni hosil qilish mumkin.

6. Y / Δ yoki Δ / Y sxemalarida transformator bakining qopqog'iga

chiqarilgan uchta fazaviy chulg'am qisqichlarining standart bo'yicha (A-B-C va a-b-c) joylashtirilishi uchun 1, 5, 7 va 11-toq guruhlarni olish mumkin. 3 va 9-toq guruhlarni hosil qilish uchun esa fazalar belgilanishini (masalan, PK chulg'am tomondan) o'zgartirish zarur bo'ladi.

7. Δ / Δ sxemalari 0, 2, 4, 6, 8 va 10-juft guruhlarni beradi.

8. Y / Z sxemalarida chulg'am qisqichlari yuqorida ko'rsatilgandek (A-B-C va *a*-*b*-c) ketma-ketlikda joylashtirilganda 1, 5, 7 va 11-guruhlarni olish mumkin.

9. YK yoki PK chulg'amlarning tegishlicha X, Y, Z yoki x, y, z oxirlarini ularning boshlari sifatida foydalanish, ya'ni bir xil kuchlanishli fazaviy chulg'am boshi va oxirlarini almashtirib belgilashda faqat "yulduz" sxemasi uchungina guruhni oltitaga o'zgartiradi.

10. "Uchburchak" yoki "zigzag" sxemalari uchun har bitta fazaviy chulg'am boshi va oxirlarini o'zaro almashtirib belgilashda chulg'amning o'ralish yo'nalishi bilan bir vaqtda fazalararo ulanish ketma-ketligi ham o'zgarganligi tufayli guruhni oldingidek oltitaga emas, balki boshqaga o'zgartiradi.

11. Uch fazali ikki chulg'amli transformatorlarning barcha ulanish guruhlaridan quyidagi: $Y / Y_0 - 0$, $Y / \Delta - 11$, $Y_0 / \Delta - 11$, $Y / Z - 11$ ulanish sxemalari va guruhlarini amaliyot uchun standart tavsiya qilgan.

6.3. Transformatorlarning parallel ishlashi

Ikki (yoki undan ko'p) transformatorlarning birlamchi chulg'amlari bitta elektr tarmog'idan (manbayidan) energiya bilan ta'minlanib, ikkilamchi chulg'amlari esa umumiy iste'molchiga (yoki tarmoqqa) ulangan holdagi ishini transformatorlarning *parallel ishlashi* deyiladi.

Transformatorlarni parallel ishlatish iste'molchilarni elektr energiya bilan uzluksiz ta'minlashda *katta amaliy ahamiyatga egadir*. Masalan, parallel ishlayotgan transformatorlardan birortasida avariya holati sodir bo'lsa yoki ta'mirlash uchun uni manbadan ajratganda ham energiya ta'minoti uzilmaydi, chunki bu holda iste'molchilar elektr energiyani parallel ishlayotgan boshqa transformator(lar)dan oladi. Podstansiyaning umumiy yuklamasi oshganda parallel ishlayotgan transformatorlarning soni oshirilib, yuklama kamayganda esa transformatorlarning bir qismi tarmoqdan ajratib qo'yiladi. Transformatorlar yuklamasining shu tarzda optimallanishi, ularning energetik ko'rsatkichlari (FIK va $\cos\varphi$)ni yaxshilaydi.

Transformatorlarni parallel ishlashga ulash shartlari. Transformatorlarni parallel ishlashga ulashda ularning chulg'amlarida tenglashtiruvchi toklarning vujudga kelmasligi va umumiy yuklama parallel ulangan transformatorlarning quvvatiga mos holda taqsimlanishi zarur bo'ladi. Buning uchun *quyidagi shartlar bajarilishi talab qilinadi:*

1) parallel ulanadigan va ishlab turgan transformatorlarning birlamchi nominal kuchlanishlari o'zaro teng ($U_{1N(I)} = U_{1N(II)} = ...$) va ikkilamchi nominal kuchlanishlari ham teng bo'lishi, ya'ni liniyaviy transformatsiyalash koeffitsientlari (k_l) bir xil bo'lishi lozim:

$$k_{lI} = k_{lII} = k_{lIII} = ... \qquad (6.5)$$

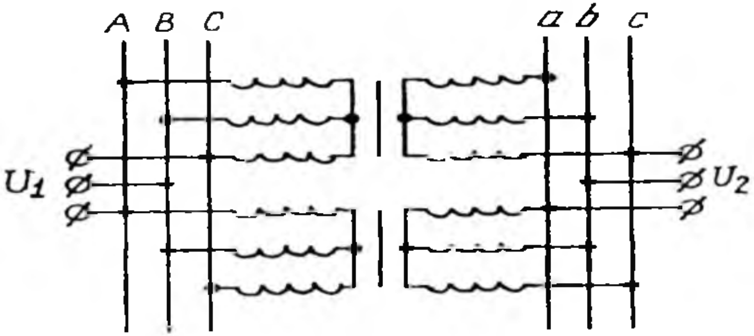
2) parallel ulanadigan va ishlab turgan transformatorlarning qisqa tutashuv kuchlanishlari bir xil bo'lishi kerak, ya'ni

$$u_{qt.I} = u_{qt.II} = u_{qt.III} = ... \qquad (6.6)$$

3) transformatorlar chulg'amlarining ulanishi sxemalari va guruhlari bir xil bo'lishi lozim.

Parallel ishlashga ulangan ikkita uch fazali kuch transformatorining sxemasi 6.5-rasmda ko'rsatilgan.

Transformatsiyalash koeffitsientlari k_l, ularning o'rtacha arifmetik qiymatlaridan farqi ± 0,5 foizgacha, qisqa tutashuv kuchlanishlari u_{qt} esa (±10) foizgacha farqli bo'lgan hollarda ham transformatorlarni parallel ishlatish mumkinligi standartda belgilangan. Undan tashqari parallel ishlaydigan transformatorlar *nominal quvvatlarining farqi uch martadan oshmasligi kerak*, chunki transformatorning qisqa tutashuv



6.5-rasm. *Parallel ishlashga ulangan ikkita uch fazali kuch transformatorining sxemasi.*

kuchlanishi u_{qt} uning nominal quvvati va kuchlanishi oshgan sari oshib boradi.

Chulg'amlarining ulanish guruhlari har xil bo'lgan holda transformatorlarni parallel ulash mumkin emas, chunki bu holda ularning chulg'amlaridan qiymati taxminan qisqa tutashuv tokining qiymatiga yetadigan tenglashtiruvchi toklar o'tadi. *Bu esa transformatorlar uchun xavflidir.*

Yuqorida ko'rsatilgan shartlardan birortasi to'la bajarilmagan hollarda transformatorlarning parallel ishlashini ko'rib chiqamiz.

Transformatsiyalash koeffitsientlari har xil bo'lgan transformatorlarning parallel ishlashi. Parallel ishlayotgan transformatorlar ikkilamchi chulg'amlaridagi EYK lar ($\underline{E}_{2I}$, $\underline{E}_{2II}$) qarama-qarshi ulangan bo'lgani uchun vektor diagrammada ularning vektorlari o'zaro teskari yo'naltirib chiziladi (6.6,*a*-rasm). Agar transformatorlarning birlamchi chulg'am EYK lari shartga ko'ra teng bo'lsa, unda transformatsiyalash koeffitsientlari $k_{I} < k_{II}$ bo'lganda ikkilamchi chulg'am EYK lari $\underline{E}_{2I} > \underline{E}_{2II}$ bo'ladi va qarama-qarshi yo'nalgan bu EYK larning vektor yig'indisi tufayli natijaviy EYK $\Delta\underline{E} = \underline{E}_{2I} + \underline{E}_{2II}$ hosil bo'lib, u transformatorlar chulg'amlari orasida tenglashtiruvchi tok I_{teng} ni vujudga keltiradi:

$$I_{teng} = \Delta E \,/\, (\underline{Z}_{qt.I} + \underline{Z}_{qt.II}), \qquad (6.7)$$

bu yerda $\underline{Z}_{qt}$ – to'la qisqa tutashuv qarshiligi; "I" indeks birinchi transformatorga, indeks "II" esa ikkinchi transformatorga tegishli. Odatda katta quvvatli transformatorlarda $(x_{qt.I} + x_{qt.II}) > (r_{qt.I} + r_{qt.II})$ bo'lganligidan $r_{qt.I}$ va $r_{qt.II}$ qarshiliklarini e'tiborga olmasa ham bo'ladi. Bu holda tenglashtiruvchi tok I_{teng} EYK $\Delta\underline{E}$ dan chorak davr (90°) ga orqada qoladi. Bu tok qiymati katta bo'lgan EYK $\underline{E}_{2I}$ ga nisbatan induktiv bo'lib, qiymati kichik bo'lgan EYK $\underline{E}_{2II}$ ga nisbatan esa sig'imiydir (6.6,*a*-rasm).

Yuklama ulanganda $\underline{I}_{teng}$ tok yuklama toki $\underline{I}_{yu}$ ga geometrik qo'shiladi. Ikkilamchi chulg'am EYK $\underline{E}_{2I}$ uning kuchlanishi $\underline{U}_{2I}$ dan katta ($\underline{E}_{2I} > \underline{U}_{2I}$) bo'lgan 1-transformator (T_I) toki quyidagiga teng: $\underline{I}_{2I} = \underline{I}_{yu.I} + \underline{I}_{teng}$.

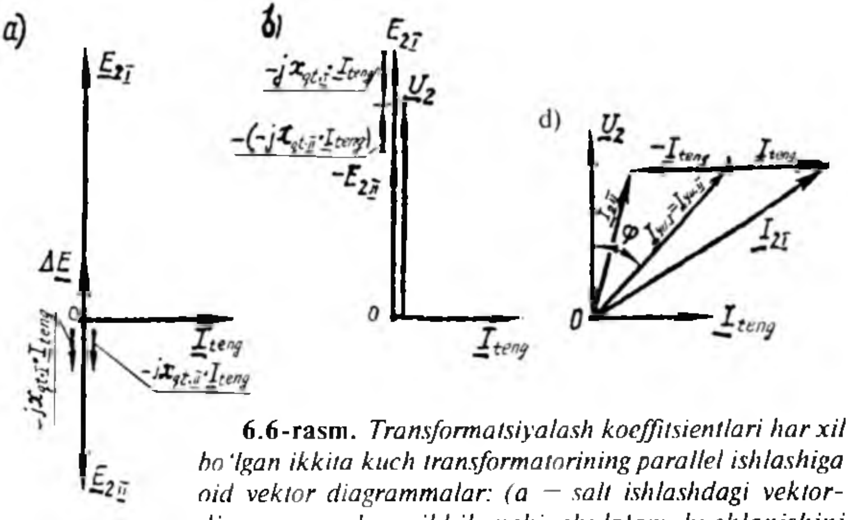
Agar tekshirilayotgan paytda 1-transformatorda $\underline{I}_{teng}$ tok chulg'am boshidan uning oxiriga o'tayotgan bo'lsa, 2-transformatorda esa u chulg'am oxiridan uning boshiga o'tadi va, shu sababli 2-transformator (T_{II}) ning toki quyidagi tenglama bilan aniqlanadi, ya'ni $\underline{I}_{2II} = \underline{I}_{yu.II} + \underline{I}_{teng}$ (6.6,*d*-rasm).

$\underline{I}_{teng}$ tokning ta'siri tufayli transformatorlarda toklar tengsizligi ($I_{2.I} > I_{2.II}$) hosil bo'ladi. Bunday sharoitda 1-transformator T_I o'ta yuklanib, 2-transformator T_{II} ning yuklamasi esa me'yoridan kam bo'ladi.

Transformator (T_I) ikkilamchi chulg'amida I_{teng} toki vujudga keltirgan kuchlanish pasayishi ($-jx_{qt.II} \cdot \underline{I}_{teng}$) EYK $E_{2.II}$ ga qarama-qarshi yo'nalgan, transformator (T_{II}) ikkilamchi chulg'amida tenglashtiruvchi tok tufayli vujudga kelgan kuchlanish pasayishi vektori ($-jx_{qt.II} \cdot \underline{I}_{teng}$) esa EYK vektori E_{2II} bilan mos yo'nalgan. Natijada transformatorlarning ikkilamchi chulg'amlarida $\underline{E}_{2.I} >> \underline{U}_2 > \underline{E}_{2.II}$ bo'lgan holda umumiy kuchlanish $\underline{U}_2$ barqaror bo'ladi (6.6,*b*-rasm).

Qisqa tutashuv kuchlanishi bir xil bo'lmagan transformatorlarning parallel ishlashi. Agar $k_{tI} = k_{tII}$ va chulg'amlarining ulanish guruhlari bir xil bo'lib, qisqa tutashuv kuchlanishlari teng bo'lmagan ($u_{qt.I}$№№ $u_{qt.II}$) ikkala transformatorni parallel ishlashga ulaganda yuklama oshirilsa, qisqa tutashuv kuchlanishi kam bo'lgan transformator ikkinchisiga nisbatan oldin nominal quvvatiga erishadi. Umuman, parallel ishlayotgan transformatorlar orasida yuklama ularning qisqa tutashuv kuchlanishlariga teskari mutanosiblikda taqsimlanadi:

$$(S_I / S_{I.N}) : (S_{II} / S_{II.N}) = u_{qt.II} / u_{qt.I} \,. \qquad (6.8)$$

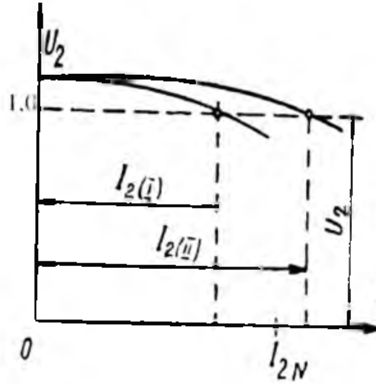


6.6-rasm. *Transformatsiyalash koeffitsientlari har xil bo'lgan ikkita kuch transformatorining parallel ishlashiga oid vektor diagrammalar: (a — salt ishlashdagi vektor-diagramma; b — ikkilamchi chulg'am kuchlanishini aniqlash; d — I va II transformatorning toklarini aniqlash).*

T_{II} ni ham nominal quvvatgacha yuklash maqsadida umumiy yuklama yana ham oshirilganda T_I ning yuklamasi me'yordan oshib ketadi. *Bu esa amaliyot uchun salbiy holdir.* Parallel ishlatiladigan transformatorlar nominal quvvatlarining nisbati 3 : 1 dan katta bo'lmasligi kerak.

Demak, qisqa tutashuv kuchlanishlari har xil bo'lgan transformatorlarni parallel ishlatishda ularning o'rnatilgan quvvatidan to'la foydalanib bo'lmas ekan.

Agar tashqi xarakteristikalari ma'lum bo'lsa, berilgan ikkilamchi chulg'am kuchlanishi kattaligi bo'yicha parallel ishlayotgan transformatorlarning tokini grafik usulda aniqlash mumkin (6.7-rasm).

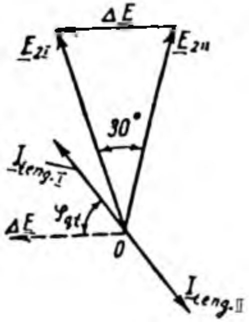


6.7-rasm. *Qisqa tutashuv kuchlanishlari bir xil bo'lmagan holda parallel ishlayotgan ikkita transformatorning tashqi xarakteristikalari yordamida yuklama taqsimlanishini aniqlash.*

Umumiy yuklama ulanganda qisqa tutashuv kuchlanishi u_{qt} katta bo'lgan transformatorning kuchlanish pasayishi ko'p bo'lib, uning tashqi xarakteristikasi absissalar o'qiga ko'proq og'adi. Ordinatasi nominal kuchlanishga teng bo'lgan nuqtadan absissalar o'qiga o'tkazilgan parallel chiziqning tashqi xarakteristikalar bilan kesishish nuqtalari izlanayotgan toklarning qiymatini beradi.

Chulg'amlarning ulanish guruhlari har xil bo'lgan transformatorlarning parallel ishlashi. Aytaylik, chulg'amlari Y/Y− 0 va Y / Δ −11 ulangan birlamchi va ikkilamchi nominal kuchlanishlari bir xil ($U_{1N\,I}=U_{1N\,II}$; $U_{2N\,I}=U_{2N\,I}$) bo'lgan ikkita transformator parallel ishlash uchun ulangan. Unda ikkilamchi chulg'amlar mos fazalarining EYK lari E_{2I} va E_{2II} kattaligi jihatdan teng, lekin fazasi 30° siljigan (6.8-rasm).

Ikkilamchi chulg'amlar ulangan konturda bu EYK larning ayirmasi



6.8-rasm. *Y / Δ –11va Y / Y– 0 guruhlarga ega bo'lgan transformatorlarning parallel ishlashida vujudga keladigan tenglashtiruvchi toklar.*

ta'sir qilib, uning kattaligi:

$$\Delta E = 2\ E_2 \sin(30 / 2) \approx 0{,}52\ E_2. \qquad (6.9)$$

Hosil bo'lgan ΔE ta'sirida transformatorlarning ikkilamchi chulg'amlaridan tenglashtiruvchi tok $I_{teng.2}$ o'tib, bu esa, birlamchi chulg'amlardan ham tenglashtiruvchi tok $I_{teng.1}$ o'tishiga sababchi bo'ladi. Uning kattaligi:

$$I_{teng} = \Delta E / (Z_{qt.I} + Z_{qt.II}). \qquad (6.10)$$

Agar, masalan, ishlayotgan ikkita transformatorning quvvatlari bir xil va nisbiy birliklardagi to'la qisqa tutashuv qarshiliklari va kuchlanishlari $Z_{qt.I} = Z_{qt.II} = u_{qt.I} = u_{qt.II} = 0{,}05$ bo'lsa, unda I_{teng} / I_N nisbat quyidagiga teng bo'ladi: $I_{teng} = 0{,}52/(2 \cdot 0{,}05) \approx 5{,}2$. Demak, salt ishlash rejimda ham I_{teng} tok nominal tokka nisbatan taxminan 5,2 marta katta bo'lar ekan. Demak, har xil guruhdagi transformatorlarni parallel ishlashga ulash mumkin emas ekan.

Nazorat savollari:

1. Uch fazali transformatorda ulanish guruhi qanday aniqlanadi?

3. Ulanish guruhi tajriba yo'li bilan qanday aniqlanadi?

4. Transformatorlarni parallel ishlatishning ahamiyati nimada?

5. Qanday shartlar bajarilganda transformatorlarni parallel ulash mumkin?

7-BOB. UCH CHULG‘AMLI TRANSFORMATORLAR. AVTOTRANSFORMATORLAR

7.1. Uch chulg‘amli transformatorlar

Uch chulg‘amli transformatorda o‘zakka o‘rnatilgan o‘zaro elektr ravishda ulanmagan uchta chulg‘am bo‘ladi. Agar transformator pasaytiruvchi bo‘lsa, ulardan eng YK chulg‘am birlamchi chulg‘am bo‘ladi, qolgan ikkitasi esa ikkilamchi chulg‘am hisoblanadi.

Uch chulg‘amli transformatorning ishlash prinsipi ikki chulg‘amli oddiy transformatorning ishlash prinsipidan farq qilmaydi.

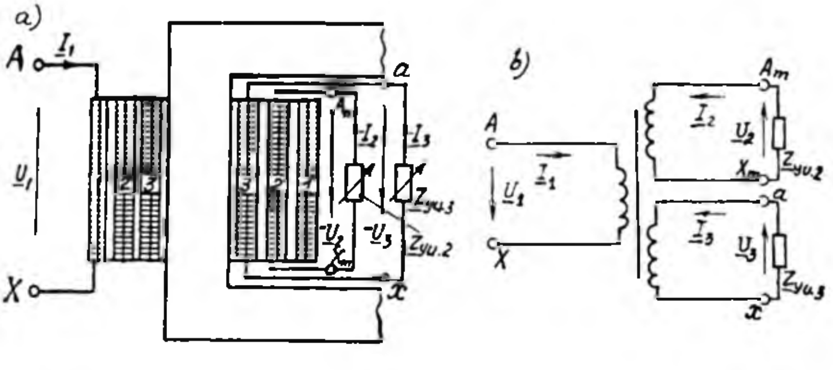
Birlamchi chulg‘amga o‘zgaruvchan tok berilganda magnit o‘tkazgichda o‘zgaruvchan magnit oqim hosil bo‘lib, uning kuch chiziqlari ikkinchi va 3-chulg‘amlarni kesib o‘tishi tufayli, ularda mos ravishda E_2 va E_3 EYK lar hosil bo‘ladi. Ikkinchi va 3-chulg‘amlarga yuklama ulansa, shu chulg‘amlardagi EYK lar ta'sirida ulardan mos ravishda I_2 va I_3 toklar o‘tib, chulg‘amlarning chiqish uchlarida tegishlicha U_2 va U_3 kuchlanishlar yuzaga keladi (7.1-rasm).

Uch chulg‘amli transformatorning magnit yurituvchi kuchlari muvozanat tenglamasi quyidagicha yoziladi:

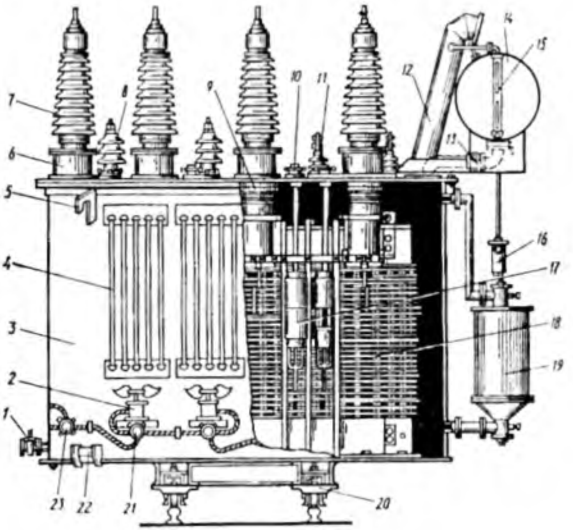
$$\underline{I}_0 w_1 \approx \underline{I}_1 w_1 + \underline{I}_2 w_2 + \underline{I}_3 w_3 \; . \qquad (7.1)$$

Bu tenglamaning chap va o‘ng tomonini w_1 ga bo‘lib, $\underline{I}_2 \cdot w_2 / w_1 = \underline{I}'_2$ va $\underline{I}_3 \cdot w_3 / w_1 = \underline{I}'_3$ belgilashlar kiritgandan keyin uch chulg‘amli transformator toklarining muvozanat tenglamasini hosil qilamiz:

$$\underline{I}_0 \approx \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 + \underline{I}'_3 \; . \qquad (7.2)$$



7.1-rasm. *Uch chulg‘amli pasaytiruvchi transformator o‘zagida chulg‘amlarning joylashtirilishi (**a**) va prinsipial sxemasi (**b**).*

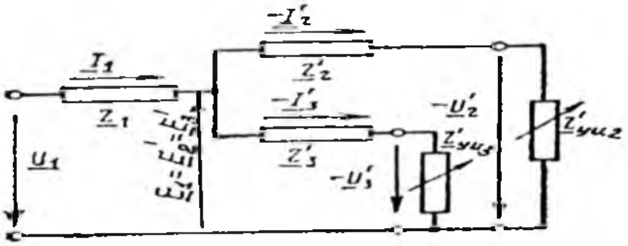


7.2-rasm. *Quvvati 16 MV·A, 110 / 38,5 / 11 kV, TDT–16000/110 tipli uch fazali uch chulg'amli transformator:* ***1*** *– kran;* ***2*** *– ventilator;* ***3*** *– bak;* ***4*** *– radiator;* ***5*** *– ilgich;* ***6*** *– tok transformatori bilan o'tish flanetsi;* ***7*** *– yuqori kuchlanish uchun o'tish izolatori;* ***8*** *– o'rta kuchlanish (38,5 kV) o'tish izolatori;* ***9*** *– 110 kV o'tish izolatorining qog'oz-bakelit silindri;* ***10*** *– PBV qayta ulagichi yuritmasi;* ***11*** *– past kuchlanish (11 kV) o'tish izolatori;* ***12*** *– chiqarish trubasi;* ***13*** *– gaz relesi;* ***14*** *– kengaytirgich;* ***15*** *– moy ko'rsatkich;* ***16*** *– havo quritkich;* ***17*** *– YK chulg'am qayta ulagichi;* ***18*** *– YK chulg'am (110 kV);* ***19*** *– termosifonli filtr;* ***20*** *– transformatorni siljitish uchun aravacha;* ***21*** *– taqsimlash qutichasi;* ***22*** *– domkrat o'rnatish uchun tokcha;* ***23*** *– bosh quticha.*

Umumiy maqsadli uch chulg'amli kuch transformatorlari katta quvvatlar (6300÷80 000 kV·A)ga va yuqori kuchlanishlar (35÷220 kV)ga mo'ljallab tayyorlanadi. 7.2-rasmda shunday transformatorlardan TDT–16000/110 tipi ko'rsatilgan. Bunday transformatorlarda salt ishlash toki I_0 nominal tok I_{1N} ning juda ham kam qismi (0,5÷1,2 %) ni tashkil qilganligidan, uni e'tiborga olmagan (I_0»" 0) holda, uch chulg'amli transformator toklarining muvozanat tenglamasi quyidagicha yoziladi:

$\underline{I}_1 \approx -(\underline{I}'_2 + \underline{I}'_3)$. (7.3)

Uch chulg'amli transformatorning afzalligi shundaki, ayrim hollarda



7.3-rasm. *Uch chulg'amli transformatorning almashtirish sxemasi.*

elektr stansiyasida yoki transformator podstansiyasida kuchlanishi har xil bo'lgan ikkita ikki chulg'amli kuch transformatori o'rniga bitta uch chulg'amli transformator ishlatish mumkin. Bu holda transformator o'rnatish uchun kam joy talab qilinadi, energiya isroflari nisbatan kamayadi va podstansiya tannarxi arzonlashadi.

Uch chulg'amli transformatorda barqaror elektromagnit jarayonlar ikki chulg'amli transformatornikiga o'xshash holda quyidagi tenglamalar sistemasi orqali ifodalanadi:

$$\left.\begin{array}{ll} a)\ \underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1\underline{Z}_1; & b)\ \underline{U}'_2 = \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2\underline{Z}'_2; \\ c)\ \underline{U}'_3 = \underline{E}'_3 - \underline{I}'_3\underline{Z}'_3; & d)\ \underline{I}_0 = \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 + \underline{I}'_3, \end{array}\right\} \qquad (7.4)$$

bu yerda: $\underline{Z}_1 = r_1 + jx_1$, $\underline{Z}'_2 = r'_2 + jx'_2$, $\underline{Z}'_3 = r'_3 + jx'_3$ – transformator chulg'amlarining tegishlicha to'la qarshiliklari; $I'_2 = I_2 \cdot w_2/w_1$ va $I'_3 = I_3 \cdot w_3/w_1$ – birlamchi chulg'am o'ramlar soniga keltirilgan ikkinchi va 3-chulg'am toklari.

Salt ishlash toki $I_0 < I_{1N}$ bo'lganligidan magnitlanish shoxobchasini hisobga olmagan holdagi uch chulg'amli transformatorning almashtirish sxemasi 7.3-rasmda ko'rsatilgan. Mazkur sxema transformatorning parametrlari ma'lum bo'lganda va yuklamaning qarshiliklari berilgan bo'lsa transformator chulg'amlarining toklari va kuchlanishlarini hamda ulardagi isroflarni aniqlashga imkon beradi.

Ikkilamchi chulg'amlari orasidagi magnit bog'lanish ularning o'zaro bir-biriga ta'sir etishiga sababchi bo'ladi. Masalan, 2-chulg'am toki I_2 ning o'zgarishidan faqat uning kuchlanishi $\underline{U}_2$ o'zgarib qolmasdan, birlamchi chulg'am toki I_1 va 1-chulg'am to'la qarshiligidagi kuchlanish tushishi $(I_1\underline{Z}_1)$ ning o'zgarishi tufayli 3-chulg'am kuchlanishi $\underline{U}_3$ ning qiymatiga ham ta'sir qiladi.

Uch chulg'amli transformatorning transformatsiyalash koeffitsientlari (k_{12}, k_{13}, k_{23}) uning salt ishlash tajribasidan aniqlanadi:

$k_{12} \approx U_1 / U_2,\ k_{13} \approx U_1 / U_3,$

$$k_{23} \approx U_2 / U_3 = (U_2 / U_1) / (U_3 / U_1) = k_{13} / k_{12}. \qquad (7.5)$$

Uch chulg'amli transformatorda qisqa tutashuv tajribasini o'tkazish tartibi ikki chulg'amli transformator tajribasidan farq qilmaydi.

Standart tavsiyasi bo'yicha zamonaviy uch chulg'amli kuch transformatorlarida chulg'amlarining quvvatlari har bittasi 100 foiz quvvatga mo'ljallab tayyorlanadi. Bunda transformator 100 foiz quvvatni ikkilamchi chulg'amlardan bittasiga beradi yoki bu quvvat ikkinchi va 3-chulg'am quvvatlarining yig'indisiga teng bo'ladi.

Chulg'amlarning o'zakda joylashtirish ketma-ketligi transformator qisqa tutashuv kuchlanishlari qiymatiga ta'sir qiladi. Masalan, TDTN-40000/220 tipli katta quvvatli transformatorda chulg'amlar o'zakda PK–O'K–YK ketma-ketlikda joylashtirilganda ularning qisqa tutashuv kuchlanishlari $u_{qt(1\text{-}2)}$=12,5, $u_{qt(1\text{-}3)}$= 22,0 va $u_{qt(2\text{-}3)}$= 9,5 foizlarga teng bo'ladi.

Standart tavsiyasi bilan uch fazali uch chulg'amli transformatorlarda $Y_n / Y_n / \Delta - 0 - 11$ yoki $Y_n / \Delta / \Delta - 11 - 11$, bir fazali uch chulg'amli transformatorda esa $1 / 1 / 1 - 0 - 0$ guruhlar ishlatiladi.

7.2. Avtotransformatorlar

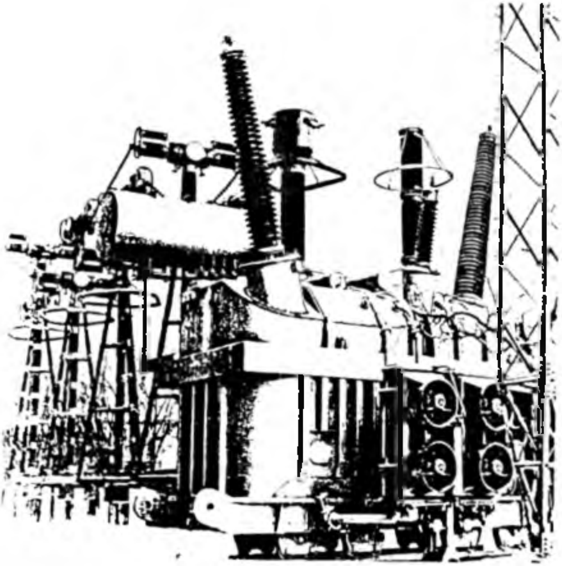
Chulg'amlari elektromagnit bog'lanishdan tashqari elektr bog'lanishga ham ega bo'lgan transformatorning bir turiga ***avtotransformator*** deb ataladi.

Transformatorda birlamchi chulg'amdan ikkilamchi chulg'amga to'la energiya elektromagnit vositasida berilsa, avtotransformator (AT)da to'la energiyaning bir qismigina shu yo'l bilan uzatilib, energiyaning boshqa qismi esa uning birlamchi va ikkilamchi zanjirlari elektr jihatdan ulanganligi tufayli bevosita beriladi.

Bu AT da elektr energiyani uzatish usulining o'ziga xos xususiyati hisoblanadi.

AT lar kuchlanishni *pasaytiruvchi va oshiruvchi, bir fazali va uch fazali, ikki chulg'amli va uch chulg'amli* turlarga bo'linadi. Agar AT chulg'amining «AX» uchlarini tarmoqqa ulab, uning «*ax*» qismiga iste'molchi ulansa – *pasaytiruvchi AT* (7.4-rasm), agarda «*ax*» qismini tarmoqqa ulab, «AX» uchlariga iste'molchi ulanganda – *oshiruvchi AT* bo'ladi.

Kam quvvatli (masalan, kuchlanishni rostlagich) AT ning bitta



7.4-rasm. *Elektr energetikasi sistemasida ekspluatatsiya uchun o'rnatilgan katta quvvatli yuqori kuchlanishli bir fazali avtotransformator.*

chulg'ami bo'lib, uning bir qismi ikkilamchi (yoki birlamchi) chulg'am vazifasini bajaradi. Bu holda chulg'am sirtidan sirpanuvchi kontaktlar yordamida ikkilamchi chulg'am o'ramlari sonini o'zgartirib kuchlanish rostlanadi. Katta quvvatli yuqori kuchlanishli AT lar uchun chulg'amlarning bunday konstruksiyasi to'g'ri kelmaydi, chunki kontaktlar katta tok yuklamasiga bardosh bera olmaydi. Shu sababli katta quvvatli AT larda elektr jihatdan ulangan o'zakda bir xil balandlikda joylashtirilgan ikkita chulg'ami bo'ladi (7.5-rasm).

AT ni amaliyotda bajaradigan vazifasi nuqtayi nazardan o'rganish muhim ahamiyat kasb etadi, *chunki bunda ularning o'ziga xos xususiyatlari to'la ravishda namoyon bo'ladi.*

Ishlash prinsipi. AT ning salt ishlash rejimidagi elektromagnit jarayon odatdagi transformatornikidan farq qilmaydi. Yuklama ulanmagan pasaytiruvchi AT ning (7.4-rasm) «AX» chulg'amiga (o'ramlar soni W_{AX}) o'zgaruvchan kuchlanish U_1 berilganda undan salt ishlash toki I_{0A} o'tib, transformatordagi singari o'zinduksiya EYK E_1 ni hosil qiladi. Salt ishlashda shu chulg'amning yuklama ulanadigan (o'ramlar soni W_{ax}) qismidagi EYK E_{ax} kelib chiqishiga ko'ra o'zinduksiya EYK bo'lib, E_{AX} ning bir qismini tashkil etadi (*Izoh:*

Transformator ikkilamchi chulg'amida esa o'zaro induksiya EYK hosil bo'ladi).

Salt ishlash rejimdan AT ning transformatsiyalash koeffitsienti k_A, salt ishlash toki I_{0XA}, isroflari R_{0XA} va almashtirish sxemasining parametrlarini aniqlash mumkin.

AT ning transformatsiyalash koeffitsienti k_A quyidagicha aniqlanadi:

$$k_A = E_{YK} / E_{PK} = w_{AX} / w_{ax} \approx U_1 / U_2 \ . \qquad (7.7)$$

Pasaytiruvchi AT ga yuklama ulanganda chulg'amining birlamchi zanjiridan I_1, ikkilamchi zanjiridan esa $I_2 > I_1$ tok o'tadi. Bu holdagi AT ning MYK muvozanat tenglamasi quyidagicha yoziladi:

$$\underline{I}_1 w_1 + \underline{I}_2 w_2 = \underline{I}_0 w_1, \qquad (7.8)$$

bu yerda $\underline{I}_0$ – "A-X" chulg'amdan o'tuvchi magnitlovchi tok.

$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 - \underline{I}_2/k_A$ tok chulg'amning faqat «A–*a*» qismidan o'tib, ikkala chulg'am uchun umumiy bo'lgan «*a*–x» qismidan esa $\underline{I}_1$ va $\underline{I}_2$ toklarning geometrik yig'indisiga teng bo'lgan

$$\underline{I}_{ax} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = \underline{I}_0 - \underline{I}_2 \cdot k_A + \underline{I}_2 = \underline{I}_0 + \underline{I}_2 (1 - 1/k_A) \qquad (7.9)$$

tok o'tadi. I_1 va I_2 toklar faza jihatdan deyarli 180° bo'lgani tufayli ($I_0 \approx 0$) ularni algebraik ayirma ko'rinishida yozish mumkin:

$$I_{ax} = I_2 - I_1 \ . \qquad (7.10)$$

Bundan ko'rinishicha, pasaytirilgan AT chulg'amining umumiy qismi «*a*-x» bo'yicha o'tayotgan tok I_a birlamchi zanjir toki I_1 ga teskari, ikkilamchi zanjir toki I_2 bilan esa mos yo'nalgan bo'ladi.

Agar AT ning transformatsiyalash koeffitsienti 1 ga yaqin bo'lsa, I_1 va I_2 toklar bir-biridan kam farq qilib, ularning ayirmasi kichik qiymatni tashkil etadi. Bu hol AT chulg'amining umumiy (*a*-x) qismini ***kesim yuzasi kichik bo'lgan simdan tayyorlashga imkon beradi.***

AT da chulg'am ikkilamchi zanjirining chiqishidagi to'la quvvat S_2 ni «o'tuvchi quvvat ($S_{o't}$)» deyiladi. Bundan tashqari, birlamchi zanjirdan ikkilamchisiga magnit maydoni vositasida uzatiladigan hisobiy ($S_h = S_{em}$) quvvat ham mavjuddir. Buni ***hisobiy quvvat deyilishiga sabab shuki***, ATning gabarit o'lchamlari va og'irligi shu quvvat kattaligiga bog'liq bo'ladi.

Demak, AT da hisobiy quvvat o'tuvchi quvvatning bir qismini tashkil etib, qolgan qismi esa elektr bog'lanish hisobiga chulg'amning birlamchi zanjiridan ikkinchisiga uzatiladi, ya'ni:

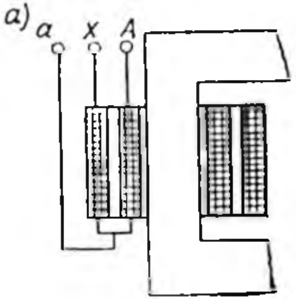
$$S_{o't} = S_e + S_h \ . \qquad (7.11)$$

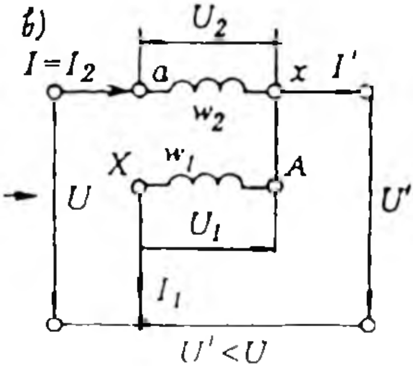
Katta quvvatli AT lar ish jarayonining o'ziga xos xususiyatlari.

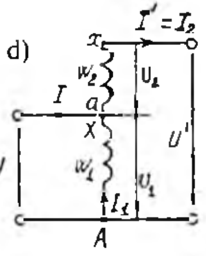
Katta quvvatli AT larda elektr jihatdan ulangan ikkita (parallel va

ketma-ket) chulg'ami bo'ladi. 7.5,d-rasmda PK (U) kirish tarmog'idan kuchlanishi oshirilgan (U' >U) chiqish tarmog'iga elektr energiyani uzatishda ishlatiladigan bir fazali oshiruvchi AT ning prinsipial sxemasi ko'rsatilgan. AT da o'ramlar soni w_1 bo'lgan bitta chulg'ami (ko'rilayotgan holda PK) elektr tarmoqqa parallel ulanib, o'ramlar soni w_2 bo'lgan ikkinchi chulg'ami esa unga ketma-ket ulanadi.

Elektroenergetika sistemalarini bog'lovchi katta quvvatli AT larda chulg'amlarni "birlamchi" va "ikkilamchi" deb atalishi shartli ravishdagi tushunchadir, chunki bunday AT larning qaysi chulg'amiga energiya kiritilishini, qaysi biridan esa uning chiqarilishini ajratib olishning iloji bo'lmaydi. Shu sababli YK yoki PK tarmoq kuchlanishiga bevosita ulangan chulg'amni "umumiy (yoki parallel)" chulg'am deb, energiya manbayiga yoki iste'molchiga ketma-ket ulangan chulg'amni esa "ketma-ket" chulg'am deb atalsa maqsadga muvofiq bo'ladi. Umumiy chulg'am uchlarining boshi va oxirlarini "A", "X", unga tegishli kattaliklarni "1" indeksi bilan, ketma-ket chulg'am uchlarining boshi va oxirlarini "*a*", "x", unga oid kattaliklarni esa "2" indeksi bilan belgilaymiz. Bu chulg'amlar o'zakda birining tashqarisiga ikkinchisi qurshalgan holda joylashtiriladi (7.5,*a*-rasm).







7.5-rasm. *Katta quvvatli AT o'zagida chulg'amlarning joylashtirilishi (**a**) va oshiruvchi AT ning prinsipial sxemasi (**b** hamda chulg'amining bir qismi ikkilamchi chulg'am vazifasini bajaradigan kam quvvatli bir fazali pasaytiruvchi AT ning prinsipial sxemasi (**d**) .*

Ketma-ket chulg'amda hosil bo'ladigan EYK E_2 tufayli AT ning birlamchi va ikkilamchi tomonlarida har xil (U va U') kuchlanish olish mumkin bo'ladi. Oshiruvchi AT da ketma-ket chulg'amni kirish tarmog'ining "x" uchiga shunday ulash lozimki, bunda uning kuchlanishi U_2 birlamchi tarmoq kuchlanishi U ga qo'shilib, uni U' gacha oshirsin, ya'ni:

$$\underline{U}' = \underline{U} + \underline{U}_2 . \qquad (7.12)$$

AT ning ketma-ket chulg'ami kirish va chiqish tarmoqlari bilan kontaktda bo'lgani tufayli uning izolatsiyasi YK tarmoq kuchlanishi (U')ga mo'ljallab hisoblanishi lozim.

AT dagi asosiy elektromagnit jarayonlarni oydinlashtirish maqsadida undagi kam qiymatli salt ishlash isroflari, kuchlanish pasayishlari va magnitlovchi tokni e'tiborga olmagan holda quyidagi nisbatni yozish mumkin:

$$U / U' = E_1 / (E_1 + E_2) = 1 / (1 + 1 / k_W), \qquad (7.13)$$

bu yerda

$$k_W = E_1 / E_2 = w_1 / w_2 \qquad (7.14)$$

— AT da chulg'amlar o'ramlari sonlarining nisbati orqali ifodalangan *transformatsiyalash koeffitsienti.*

Shunday qilib, kuchlanishni o'zgartirish (oshirish yoki pasaytirish) xarakteri odatdagi *kuch transformatorida* chulg'amlar o'ramlari sonlarining nisbati orqali aniqlansa, *kuch avtotransformatorida* bu xarakter chulg'amlarni elektr ulash sxemasiga bog'liq bo'ladi. Albatta, U/U' nisbatga chulg'amlar o'ramlari sonlarining nisbati ham ta'sir qiladi. Shuning uchun AT da ikkita transformatsiyalash koeffitsientining farqiga borish zarur:

1) chulg'amlar o'ramlari sonlarining nisbati (7.14) bilan aniqlanadigan transformatsiyalash koeffitsienti k_W;

2) salt ishlashda ($I' = I_2 = 0$) AT ga kirishdagi (U) va undan chiqishdagi (U') tarmoq kuchlanishlari kattaliklarining nisbati bilan aniqlanadigan transformatsiyalash koeffitsienti k_U:

a) pasaytiruvchi AT uchun (7.5,*b*-rasm) —

$$k_U = 1 + 1 / k_W > 1. \qquad (7.15)$$

b) oshiruvchi AT uchun (7.5,*c*-rasm) —

$$k'_U = U / U' = k_W/(1+ k_W) < 1 \; ; \qquad (7.16)$$

AT ning barqaror ish rejimi elektromagnit jarayonlari quyidagi tenglamalar sistemasi bilan xarakterlanadi:

$$\left.\begin{array}{ll} a)\ -\underline{U}_1 = \underline{E}_1 - \underline{I}_1 \underline{Z}_1, & b)\ \underline{U}_2 = \underline{E}_2 - \underline{I}_2 \underline{Z}_2, \\ c)\ \underline{I}_1 + \underline{I}_2 / k_W = \underline{I}_0, & d)\ \underline{E}_1 = \underline{E}_2 k_W . \end{array}\right\} \qquad (7.17)$$

AT ni ishlab chiqarish uchun materiallar sarfi, uning gabaritlari va tannarxi odatdagi transformatordagi kabi elektromagnit quvvat S_{em} orqali aniqlanadi.

Kirishdagi (U) va chiqishdagi (U′) tarmoq kuchlanishlari nisbati $U'/U = 1{,}25 \div 2{,}5$ bo‘lgan hollarda AT ni elektroenergetika sistemalarida katta quvvatli elektr tarmoqlarni biriktirishda o‘zgartirgich sifatida qo‘llanilganda katta samara beradi.

AT ning ikkilamchi tomonidagi kuchlanish o‘zgarishi ikki chulg‘amli transformator uchun ishlatilgan formulalar bo‘yicha hisoblanadi, chunki AT ning almashtirish sxemasi transformatornikiga o‘xshash bo‘lib, faqat parametrlarining kichikligi bilan farqlanadi.

Katta quvvatli AT larda FIK $\eta = 99{,}5 \div 99{,}7$ foizga teng.

Uch fazali ikki chulg‘amli AT ning fazaviy chulg‘amlari “yulduz” sxemasi bo‘yicha ulanadi; uch chulg‘amli katta quvvatli AT ning PK chulg‘ami esa “uchburchak” sxemasi bo‘yicha ulanadi.

Uch chulg‘amli AT da PK chulg‘amning asosiy vazifasi elektr uzatish liniyasini tokning 3-garmonikasidan himoya qilishdan iborat. Uni alohida tarmoqqa ulab manba sifatida ishlatib bo‘lmaydi; faqat ayrim hollarda elektr ta’minoti sistemasi quvvat koeffitsienti cosφ ni oshirish maqsadida sinxron kompensator yoki zarur bo‘lganda reaktor ulash mumkin, xolos.

AT larning *afzalliklari* quyidagilardan iborat:

1) aktiv (mis, elektrotexnik po‘lat) va izolatsion materiallar kam sarflanadi; 2) gabarit o‘lchamlari nisbatan kichik; 3) FIK nisbatan katta, tannarxi esa arzon.

Kuch AT lari katta quvvatli sinxron va asinxron motorlarni ishga tushirishda hamda yuqori va o‘ta yuqori kuchlanishli elektr uzatish liniyalarida bir-biriga yaqin, masalan, 110 va 220 kV; 220 va 500 kV kuchlanishli elektr sistemalarini bog‘lashda qo‘llaniladi.

AT ning transformatsiyalash koeffitsienti $k_{tr} > 2,5$ bo'lsa hal qiluvchi hisoblanadigan *quyidagi kamchiliklarga ega bo'ladi*:

1) pasaytiruvchi AT da I_{qt} ning katta bo'lishi; 2) yuqori kuchlanish tomonining past kuchlanish tomoni bilan elektr jihatdan ulanganligi sababli, butun chulg'am izolatsiyasining juda katta elektr mustahkamlikka ega bo'lishini talab etadi; 3) pasaytiruvchi katta quvvatli AT larda past kuchlanish tarmog'ining simlari bilan yer orasida xavfsiz ishlatish shartlariga aslo to'g'ri kelmaydigan katta kuchlanish paydo bo'ladi.

Nazorat savollari:

1. *Uch chulg'amli transformator qanday ishlaydi?*
2. *Uch chulg'amli transformatorning qanday afzalliklari bor?*
3. *AT ning o'ziga xos xususiyatlari nimalardan iborat?*
4. *AT ning afzalliklari nimalardan iborat?*

8-BOB. IKKI CHULG'AMLI TRANSFORMATORLARNING NOSIMMETRIK ISH REJIMLARI. TRANSFORMATORLARDA O'TISH JARAYONLAR

8.1. Ikki chulg'amli transformatorlarning nosimmetrik ish rejimlari

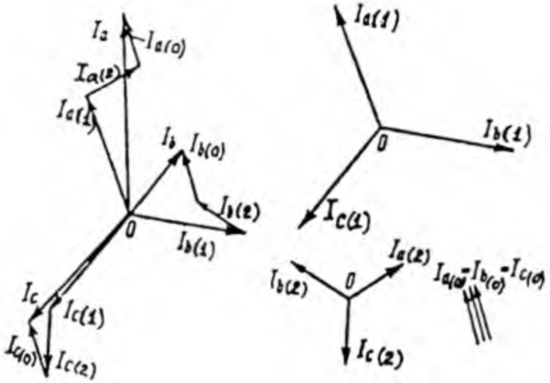
Uch fazali transformatorlarni elektr ta'minoti sistemalarida ishlatish jarayonida nosimmetrik ish rejimlari tez uchrab turadi. Bunga transformator fazalariga ulanadigan bir fazali iste'molchilarning har xil taqsimlanishi, ya'ni fazalarga ulanadigan elektr yoritgich chiroqlari yuklanishining notekisligi, katta quvvatli bir fazali iste'molchilarga kiradigan payvandlash transformatorlari, induksion pechlar, nosimmetrik qisqa tutashuvlar sababchi bo'ladi.

Fazalardagi yuklama tokining nosimmetrik bo'lishi liniya va faza kuchlanishlarini ham nosimmetrik qilib, iste'molchilarga salbiy ta'sir qiladi. Masalan, o'zgaruvchan tok motoriga nosimmetrik kuchlanish berilsa, uning quvvati kamayadi; elektr yoritgich chiroqlarining yoritishi yomonlashadi va boshqalar. Transformatorning o'zida esa qo'shimcha isroflar hosil bo'lib, uning FIK kamayadi va qizishi oshadi. *Shu sababli transformatorning nosimmetrik rejimlarini o'rganish katta amaliy ahamiyat kasb etadi.*

Simmetrik tashkil etuvchilar usuli. Nosimmetrik ish rejimlarini tekshirishda *simmetrik tashkil etuvchilar* usulidan foydalaniladi. Birlamchi chulg'am kuchlanishlari simmetrik bo'lib, katta quvvatli elektr tarmog'iga ulangan uch fazali transformatorning ikkilamchi toklari nosimmetrik bo'lganda nosimmetrik uch fazali toklar, kuchlanishlar va magnit oqimlar sistemasini uchta simmetrik sistema, ya'ni fazalarning to'g'ri, teskari va nol ketma-ketliklariga ajratish mumkin (8.1-rasm).

Transformator nosimmetrik yuklama bilan ishlaganda fazaviy toklarining qiymati har xil bo'ladi va ularning fazalariaro siljish burchagi 120°ga teng bo'lmaydi.

8.1-rasmda: $\underline{I}_a$, $\underline{I}_b$, $\underline{I}_c$ — nosimmetrik toklar sistemasi; $\underline{I}_{a(1)}$, $\underline{I}_{b(1)}$, $\underline{I}_{c(1)}$ — to'g'ri ketma-ketlikli simmetrik toklar sistemasi (bundagi toklarning moduli o'zaro teng); $\underline{I}_{a(2)}$, $\underline{I}_{b(2)}$, $\underline{I}_{c(2)}$ — teskari ketma-ketlikli simmetrik toklar sistemasi (bundagi toklar ham modul jihatdan o'zaro teng va ularning fazalar ketma-ketligi teskari); $\underline{I}_{a(0)}$, $\underline{I}_{b(0)}$, $\underline{I}_{c(0)}$ — nol



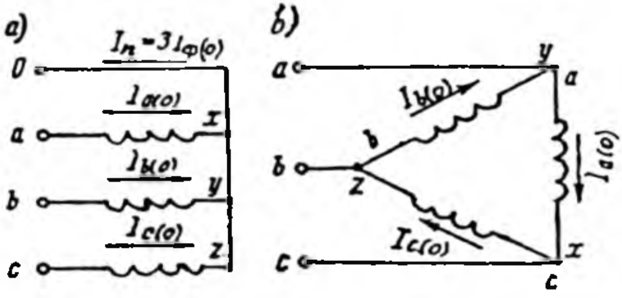
8.1-rasm. Nosimmetrik toklar sistemasini simmetrik tashkil etuvchilarga ajratish.

ketma-ketlikli toklar sistemasi (bunda toklar modul jihatdan teng bo'lib, o'zaro siljish burchagi esa 0° ga teng, ya'ni fazalari mos tushadi).

Nol ketma-ketlikli toklarning qiymati hamma fazalarda o'zaro teng va yo'nalishlari bir xil bo'lgani tufayli, bunday kontur faqat transformator chulg'ami "yulduz (Y)" sxemasiga ulanib nol simi tashqariga chiqarilgan bo'lgandagina mavjud bo'ladi.

Bu holda fazalarning nol ketma-ketlikli toklari nol simi orqali tutashadi (8.2,*a*-rasm). Chulg'amning nol simidagi toki I_n fazaning nol ketma-ketlikli toki $I_{f(0)}$ ga nisbatan uch marta katta bo'ladi:

$$\underline{I}_n = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 3\ \underline{I}_{f(0)}. \qquad (8.1)$$



8.2-rasm. *«Nol simli yulduz» (**a**) va «uchburchak» (**b**) sxemalari bo'yicha ulangan chulg'amlarda nol ketma-ketlikli toklar.*

Agar transformatorning nol nuqtasi zaminlangan (yerga ulangan) bo'lsa, nol simi vazifasini yer bajarishi mumkin.

Nol simli Y ulanishdan boshqa hamma ulanish sxemalarida ikkilamchi chulg'am liniyaviy toklari tarkibida nol ketma-ketlikli tashkil etuvchilari bo'lmaydi va bunda nosimmetrik toklar sistemasini simmetrik toklar sistemasiga ajratganda to'g'ri va teskari ketma-ketlikli toklar bo'ladi, xolos.

Nol ketma-ketlikli toklar bo'lmaganda simmetrik tashkil etuvchilar usulidan foydalanmasdan, har bitta fazaviy chulg'amni mustaqil transformator sifatida alohida qarash mumkin.

Ikkilamchi chulg'amida nol ketma-ketlikli toklari bo'lgan nosimmetrik yuklama. Bunday hol faqat ikkilamchi chulg'am Y sxemasiga ulanib, nol simi tashqariga chiqarilganda yuzaga keladi. Bu toklarning transformator ishlariga ta'siri birlamchi chulg'am qanday (Y yoki Δ) sxemaga ulanganligiga bog'liq bo'ladi. Quyida shu variantlarni alohida tahlil qilamiz.

1. Birlamchi chulg'am Y ga, ikkilamchi chulg'ami esa "nol simli yulduz (Y_0)" sxemasi bo'yicha ulanganda ikkilamchi chulg'amning keltirilgan toklari quyidagilarga teng bo'ladi:

$$\left.\begin{aligned} \underline{I}'_a &= \underline{I}'_{a(1)} + \underline{I}'_{a(2)} + \underline{I}'_{(0)}; \\ \underline{I}'_b &= \underline{I}'_{b(1)} + \underline{I}'_{b(2)} + \underline{I}'_{(0)}; \\ \underline{I}'_c &= \underline{I}'_{c(1)} + \underline{I}'_{c(2)} + \underline{I}'_{(0)}. \end{aligned}\right\} \qquad (8.2)$$

Birlamchi chulg'am Y sxemaga ulanganligidan nol ketma-ketlik tutashadigan kontur bu sxemada bo'lmaydi, va shu sababli, ikkilamchi chulg'amdagi nol ketma-ketlikli toklar birlamchi chulg'amga tranformatsiyalanmaydi, ya'ni yuqori kuchlanishli chulg'amda $\underline{I}'_{(0)} = 0$ bo'ladi. Transformatorning ikkilamchi chulg'amidagi $\underline{I}'_{(a)}$, $\underline{I}'_{(b)}$, $\underline{I}'_{(c)}$ va $\underline{I}_A$, $\underline{I}_B$, $\underline{I}_C$ toklar har bitta fazada ixtiyoriy vaqtda o'zaro teng va qarama-qarshi yo'nalgan bo'lgani uchun, ular hosil qilgan MYK lar o'zaro muvozanatlashadilar va shu sababli, transformator o'zagida magnit oqimini hosil qilmaydilar. Nol ketma-ketlikli $\underline{I}'_{(0)}$ toklar faqat ikkilamchi chulg'amdan o'tadi va magnit jihatdan hech nima bilan muvozanatlashmaganligi tufayli ular magnitlovchi toklar bo'lib, transformatorda qo'shimcha magnit oqimi $F_{(0)}$ ni hosil qiladi. Bu magnit oqimlar hamma fazalarda bir xil va fazalari mos keladi.

Uch sterjenli transformatorda $F_{(0)}$ o'zakdan o'tib, magnit qarshiligi katta bo'lgan oraliqlar orqali tutashadi va shu sababli, uning qiymati kichik bo'ladi.

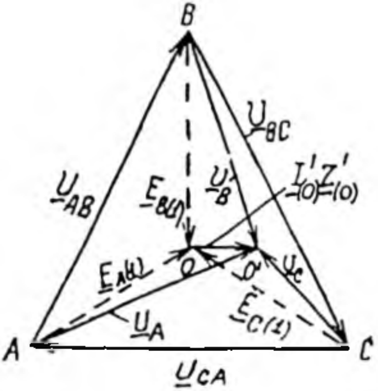
Nol ketma-ketlikli toklari va magnit oqimlarining namoyon bo'lishi transformatorning magnit to'yinishi tufayli hosil bo'ladigan 3-garmonika toklari va magnit oqimlarining namoyon bo'lishiga o'xshasada, ***ular orasida katta farqlar ham bor***, ya'ni:

a) ularning hosil bo'lish tabiati har xildir. Nol ketma-ketlikli toklari yuklama tokining nosimmetrikligidan hosil bo'lsa, 3-garmonika toki esa magnitlanish xarakteristikasining egri chiziqli bo'lganligidandir;

b) nol ketma-ketlikli toklari vaqt o'tishi bilan tarmoq chastotasiga teng bo'lgan chastotada o'zgaradi, 3-garmonika toklari esa unga nisbatan 3 marta katta ($f_3 = 3\ f_1$) chastota bilan o'zgaradi.

Chulg'amlari Y/Y_0 sxema bo'yicha ulangan transformator kuchlanishlari uchburchagining "og'irlik markazi" deb nomlanadigan 0 nuqta Y/Y_0 sxemadagi nosimmetrik yuklamada shu markazdan siljiydi. Bu siljishning kattaligi nol ketma-ketlikli toklari faza chulg'amining to'la qarshiligi $\underline{Z}_{(0)}$ da hosil qilgan $I_{(0)}\underline{Z}_{(0)}$ kuchlanish tushishiga teng (8.3-rasm).

$\underline{I}'_{(0)} = 0$ bo'lsa diagramma 0 nuqtada bo'lib, $\underline{I}'_{(0)} \neq 0$ bo'lganda esa, bu nuqta birorta 0' nuqtaga siljiydi. *Bunga sabab* Y/Y_0 sxemaga ulangan transformator ikkilamchi chulg'amidagi nol ketma-ketlikli toklari birlamchi chulg'am tomonidan muvozanatlashmay, o'zakni qo'shimcha magnitlaydi va ikkala chulg'amda nol ketma-ketlikli $E_{(0)}$ EYK larni hosil qiladi. Ular birlamchi chulg'amdagi to'g'ri ketma-ketlikli EYK lar bilan qo'shiladi:



8.3-rasm. *Chulg'amlari Y/Y_n sxemaga ulanganda nol ketma-ketlikli toklarning ta'siridan transformatorda fazaviy kuchlanishlar sistemasining buzilishini ko'rsatuvchi vektor diagramma.*

$$\underline{E}_A = \underline{E}_{A(1)} + \underline{E}_{(0)};\ \underline{E}_B = \underline{E}_{B(1)} + \underline{E}_{(0)};\ \underline{E}_C = \underline{E}_{C(1)} + \underline{E}_{(0)}. \quad (8.3)$$

Bu holda birlamchi chulg'am liniyaviy kuchlanishlari sistemasi simmetrik holda qolsa ham birlamchi va ikkilamchi chulg'amlar fazaviy kuchlanishlarining tengsizligi sezilarli darajada oshadi (8.3-rasm). Bu esa bir fazali energiya iste'molchilari uchun zararlidir. Shu sababli nol simidan o'tadigan tokning qiymati $I_n \leq 0{,}25 I_{2N}$ bo'lishi kerak.

Ikkilamchi chulg'am liniyaviy kuchlanishlariga nol ketma-ketlikli toklari ta'sir qilmay, ularda simmetriklikning buzilishi faqat teskari ketma-ketlikli toklarning mavjudligi tufayli sodir bo'ladi.

2. Birlamchi chulg'am Δ, ikkilamchi chulg'am esa Y_0 sxemasi bo'yicha ulanganda birlamchi chulg'am ichida berk kontur paydo bo'lib, unda nol ketma-ketlikli toklari uchun o'tadigan yo'l mavjud bo'lganligidan faqat shu konturda aylanadi (8.2,*b*-rasm), ya'ni liniyaga chiqmaydi. "Uchburchak" sxemasida liniyaviy toklar ikkita qo'shni fazaviy toklarning ayirmasiga teng bo'lganligidan nol ketma-ketlikli toklar liniyada paydo bo'lmaydi. Demak, Δ/Y ulanish sxemasida ikkilamchi chulg'amdagi tokning uchta tashkil etuvchilari ham birlamchi chulg'amga transformatsiya bo'ladi.

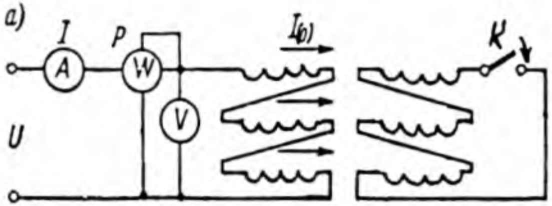
Nol ketma-ketlikli toklar hosil qilgan natijaviy magnit oqim faqat tarqalgan oqimlardan iborat bo'ladi. Bunda transformator kuchlanishlari uchburchagi "og'irlik markazi"ning siljishi uncha sezilarli bo'lmaydi.

Chulg'am Y sxemasiga ulanganda liniyaviy kuchlanishi U, Δ sxemasiga ulanganda esa liniyaviy toki I ikkita faza toklari yoki kuchlanishlari qiymatlarining geometrik ayirmasiga teng bo'lganligidan hamda bunda nol ketma-ketlikli toklar hamma fazalarda yo'nalishi bir xil bo'lgani uchun ular yo'q bo'lib ketadilar. Shu sababli birlamchi chulg'amning liniyaviy tokida va ikkilamchi chulg'amning liniyaviy kuchlanishida nol ketma-ketlikli tashkil etuvchilari bo'lmaydi.

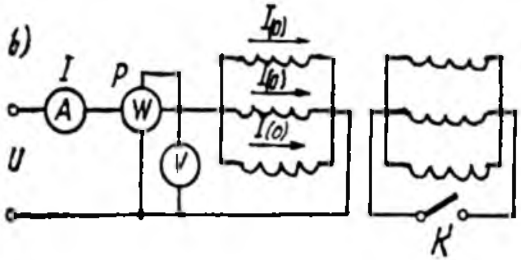
3. Transformatorning nol ketma-ketlikli qarshiliklarini tajriba yo'li bilan aniqlash. Transformatorning nol ketma-ketlikli qarshiligi $Z_{(0)}$ ni tajribada aniqlashda chulg'amda $I_a = I_b = I_c = I_{(0)}$ toklarni yaratish zarur bo'ladi. Buning uchun transformatorning birlamchi va ikkilamchi chulg'am fazalari ketma-ket (8.4,*a*-rasm) yoki parallel (8.4,*b*-rasm) ulanib bir fazali manbadan *o'zgaruvchan tok* beriladi.

Ikkilamchi chulg'am fazalari ketma-ket ulanganda ulagich "K" qo'shilgan bo'lib, parallel ulanganida esa u ochiq bo'lishi kerak (8.4-rasm).

Tajribadan olingan ma'lumotlar asosida $Z_{(0)}$, $r_{(0)}$ va $x_{(0)}$ qarshiliklar quyidagicha aniqlanadi.



8.4-rasm. *Nol ketma-ketlikli qarshiliklarni tajribada aniqlashga oid sxemalar:* ***a*** *– ketma-ket;* ***b*** *– parallel.*



Tajriba 8.4,*a*-rasmdagi sxema bo'yicha o'tkazilganda:

$$Z_{(0)} = U/(3\,I),\ r_{(0)} = P/\,(3I^2)\ ,\ x_{(0)} = \sqrt{Z_{(0)}^2 - r_{(0)}^2}\ , \qquad (8.4)$$

8.4,*b*-rasmdagi sxema bo'yicha o'tkazilganda esa:

$$Z_{(0)} = 3U/\,I\ ,\ r_{(0)} = 3P/\,I^2\ ,\ x_{(0)} = \sqrt{Z_{(0)}^2 - r_{(0)}^2}\ . \qquad (8.5)$$

Ikkilamchi chulg'amni ketma-ket ulash yo'li bilan tajriba o'tkazish nisbatan afzal hisoblanadi, chunki bu holda fazaviy toklarning tengligi barcha sharoitda ta'minlanadi.

4. Transformatorning nol ketma-ketlikli toklari bo'lmagan nosimmetrik yuklama. Agar transformatorning ikkilamchi chulg'amida nol simi chiqarilmagan bo'lsa nosimmetrik yuklamada ham nol ketma-ketlikli toklar $I_{(0)}$ bo'lmaydi. Bu natijaga transformatorning chulg'amlari Δ/Y, Y/Δ, Y/Y, Δ/Δ sxemalariga ulanganda erishiladi.

Bu sxemalarda birlamchi va ikkilamchi chulg'amlaridagi fazalarning toki magnit jihatdan o'zaro muvozanatlashadi va kuchlanishlar uchburchagining "0" nuqtasi bu holda o'z holatini o'zgartirmaydi.

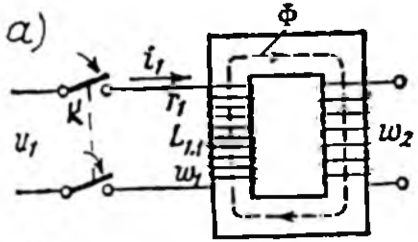
Standartga binoan, agar teskari ketma-ketlik tashkil etuvchisi to'g'ri ketma-ketlik tashkil etuvchisining 5 foizidan oshmasa, unda uch fazali kuchlanish va toklar sistemasi amaliy jihatdan simmetrik hisoblanadi.

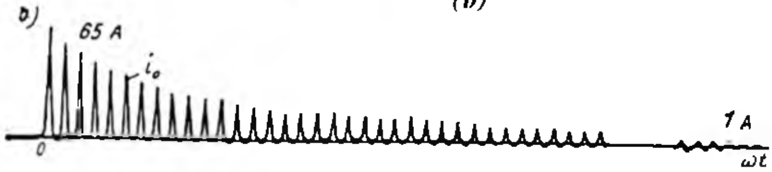
8.2. Transformatorlarda o‘tish jarayonlari

1. Yuklama ulanmagan transformatorni elektr tarmog‘iga qo‘shish

Agar transformatorning ikkilamchi chulg‘amiga yuklama ulanmagan bo‘lsa, barqaror ish holatda birlamchi chulg‘amdan salt ishlash toki o‘tadi (bu tok nominal tokning juda kam qismini tashkil qiladi).

Agar transformator elektr tarmog‘iga bevosita qo‘shilsa, o‘tish jarayoni sodir bo‘lib, undaga tokning qiymati nominal tok I_{1N} ga nisbatan bir necha marta oshadi va qisqa vaqt ichida barqaror qiymatigacha kamayadi (8.5,*b*-rasm).





8.5-rasm. *Yuklama ulanmagan o‘rta quvvatli bir fazali transformatorni elektr tarmog‘iga bevosita qo‘shish sxemasi (**a**) va bu jarayondagi tok ossillogrammasi (**b**)*

O‘tish jarayonidagi transformator kuchlanishlari muvozanat tenglamasi quyidagicha yoziladi:

$$u_1 = i_0 r_1 + w_1 d\Phi / dt . \qquad (8.6)$$

Bu tenglama egri chiziqlidir, chunki po‘lat o‘zakdagi magnit oqim F ning salt ishlash toki i_0 ga nisbatan o‘zgarishi to‘g‘ri chiziqli emas. Magnit oqim Φ o‘zining maksimal qiymatiga transformatorni elektr tarmog‘iga ulagandan keyin $\omega t \approx \pi$ da erishadi. O‘tish jarayonida magnit oqimning oshishi magnitlovchi tokning ko‘payishiga sabab bo‘ladi. Transformator magnitlanish xarakteristikasining egri chiziqli bo‘lganligidan o‘tish jarayonida I_0 tokining oshishi magnit oqimning ko‘payishiga nisbatan ham ortiq bo‘ladi.

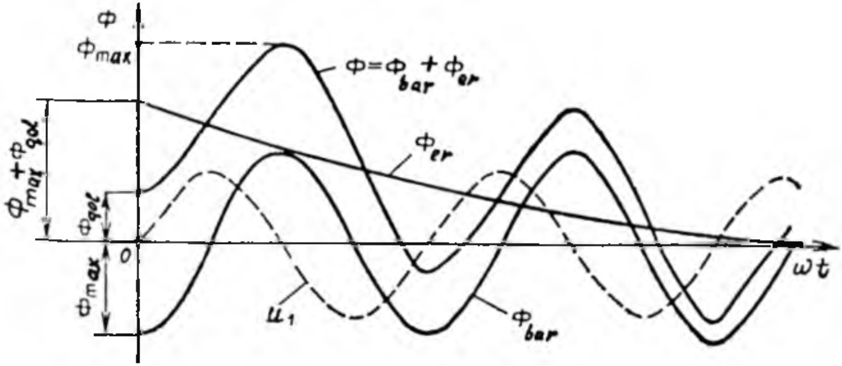
Transformatorni elektr tarmog‘iga bevosita qo‘shishning dastlabki paytida magnitlovchi tokning keskin oshgandagi oniy qiymati uning nominal toki I_{1N} qiymatiga nisbatan (2÷5) marta, salt ishlash tokining

barqaror rejimdagi qiymatidan esa (100÷120) marta katta bo'ladi.

2. Transformatorning ikkilamchi chulg'ami to'satdan qisqa tutashishi. Transformatorning ikkilamchi chulg'ami $U_1 = U_{1N}$ da to'satdan qisqa tutashsa undagi tokning qiymati nominal tok I_{1N} ga nisbatan (15÷20) marta katta bo'ladi. Bu holdagi tokni *zarbiy tok* ($i_{1qt.z} = i_{1qt.max}$) deb ataladi va quyidagicha aniqlanadi:

$$i_{1qt.z} = -I_{1qt.max}\left[1 + e^{-\pi/(\omega T_{qt})}\right] \qquad (8.7)$$

bunda T_{qt} – so'nishning vaqt doimiyligi, ya'ni qisqa tutashuvdagi tokning erkin tashkil etuvchisi so'nishiga ketgan vaqt (8.6-rasm).



8.6-rasm. *Nominal kuchlanish bilan ishlayotgan transformatorning ikkilamchi chulg'ami to'satdan qisqa tutashgandagi tokning vaqt bo'yicha o'zgarish grafigi.*

(8.7) da o'rta qavsning ichidagi son esa zarbiy tok koeffitsienti $K_{z.max}$ bo'ladi va u T_{qt} ning qiymatiga bog'liq holda (1÷2) oraliqda o'zgaradi. Katta quvvatli transformatorlar uchun $K_{z.max}$ = 1,7÷1,8 ga, kam quvvatli transformatorlar uchun esa, bu koeffitsient 1,2÷1,3 ga teng.

Kam quvvatli transformatorlar uchun vaqt doimiysi T_{qt} = 0,006 s., katta quvvatli transformatorlar uchun esa u 0,05 s. ga teng.

O'tish jarayonining davomiyligi taxminan t = (3÷4)T_{qt} s. ga teng. Demak, transformatorlarning kam quvvatlisida o'tish jarayoni tok o'zgarishining bitta davrigacha, katta quvvatlilarda esa (6÷8) davrigacha davom etadi.

Zarbiy tok $i_{lqt.z}$ ning transformator nominal toki amplitudasiga nisbati quyidagiga teng:

$$i_{lqt.max} / (\sqrt{2}\, I_{1N}) = (100/ u_{qt(\%)})\, K_{z.max} = 27\div12, \qquad (8.8)$$

(katta qiymatlar kam quvvatli kuch transformatorlariga to'g'ri keladi).

Qisqa tutashuvda transformator chulg'amlariga ta'sir qiladigan elektromagnit kuchlar zarbiy toklarning kvadratiga mutanosib ravishda o'zgarishi tufayli, bu kuchlar normal ish rejimidagi kuchlarga nisbatan 729÷144 marta oshadi. Bu kuchlar o'zining yo'nalishini o'zgartirmagan holda 2f = 2 · 50 = 100 Hz chastota bilan pulslanadi. Bunday qisqa muddatli katta kuchlarga *chulg'amlar bardosh berishi uchun ular ishonchli mahkamlanishi kerak*.

Amalda transformatorning himoya qurilmalari tok o'zgarishining 3...4 davridan keyin ishga tushib, transformatorni elektr tarmog'idan uzib qo'yishi kerak.

Nazorat savollari:

1. Qanday sabablarga ko'ra nosimmetrik yuklanish sodir bo'ladi?
2. Simmetrik tashkil etuvchilar usulini tushuntirib bering.
3. Nol ketma-ketlikli toklar qanday sxemalarda vujudga keladi?
4. Nol ketma-ketlikli qarshiliklar tajribada qanday aniqlanadi?
5. Qanday hollarda o'tish jarayoni sodir bo'ladi va ular qanday kechadi?
6. Zarbiy tok koeffitsienti nima?

9-BOB. MAXSUS MAQSADLI TRANSFORMATOR QURILMALARI

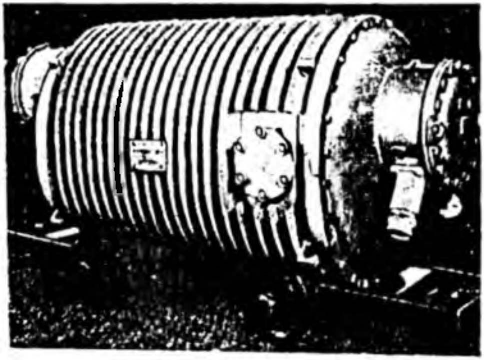
9.1. Maxsus maqsadli kuch transformatorlariga oid umumiy ma'lumotlar

Elektrotexnologiya va o'zgartirgich qurilmalarining ish rejimlari talablaridan kelib chiqqan holda ularni elektr energiya bilan ta'minlovchi transformatorlarining konstruksiyasi o'ziga xos xususiyatlarga ega bo'ladi. Shu sababli elektrotexnologiya va quvvatli o'zgartirgich qurilmalarida qo'llaniladigan transformatorlarni bundan keyin *maxsus maqsadli kuch transformatorlari* deb ataymiz.

Hozirgi vaqtda o'zgaruvchan tokni o'zgarmas tokka to'g'rilash asosan statik o'zgartirgich agregatlari yordamida amalga oshiriladi. Ularning ham *asosiy tarkibiy qismini maxsus maqsadli transformatorlar tashkil qiladi.*

Quyidagi sohalardagi elektrotexnologiyalarning to'g'rilagich qurilmalarida ishlatiladigan maxsus maqsadli kuch transformatorlariga:

a) *rangli metallurgiyada* elektroliz qurilmalari to'g'rilagichlari uchun toki 63 kA va kuchlanishi 850 V bo'lgan TSNP–80000/20 tipi; b) *kimyo sanoatida* – toki 50 kA va kuchlanishi 850 V bo'lgan TSNP – 40000/10 tipi; d) *qora metallurgiyada* – jo'valash mashinalarining tiristorli elektr yuritmalari uchun quvvati 2500÷3200 kV·A bo'lgan transformatorlar seriyasi, *elektr yoyi vositasida po'lat eritish pechlari uchun* (masalan, Bekobod metallurgiya kombinatida) PBV va RPN qayta ulagich qurilmalari bilan ta'minlangan tiplari ishlatiladi. Quvvati 100 MV·A gacha bo'lgan elektr pechi transformatorlarining ikkilamchi



9.1-rasm. *Quvvati 160 кV·A, kuchlanishi 6 кV bo'lgan TCB–160/6 tipli portlashdan himoyalangan transformator*

kuchlanishi 1000 V dan oshmaydi, bundagi ikkilamchi toklar esa 100 kA va undan katta bo'ladi.

Ko'mir shaxtalaridagi elektr motorlarini energiya bilan ta'minlash uchun quvvati 160 kV·A kuchlanishi 6 kV bo'lgan TSV—160/6 tipli portlashdan himoyalangan transformator (9.1-rasm) hamda quvvati 250 kV·A bo'lgan TSVI —250/6 tipli transformator podstansiyalari qo'llaniladi.

Neft olishdagi cho'ktirilgan elektr nasoslari asinxron motorlarini 380 V kuchlanishli elektr energiya bilan ta'minlashda TMPN—160/2,05 tipli transformator qo'llaniladi.

9.2. Elektr yoyi vositasida payvandlash uchun transformatorlar

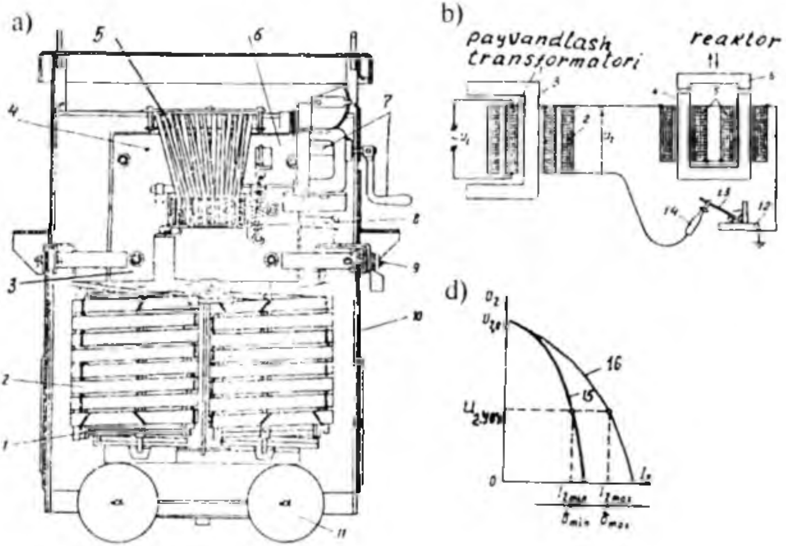
Elektr yoyi vositasida payvandlash uchun ishlatiladigan maxsus maqsadli transformatorlarni odatda *payvandlash transformatorlari* deb yuritiladi.

Payvandlash transformatorlari kuchlanishi 220 yoki 380 V bo'lgan elektr energiyani metallni yoyli payvandlash uchun zarur bo'lgan salt ishlashdagi kuchlanishi 60 V bo'lgan elektr energiyaga o'zgartirib beradi. Reaktor (drossel) — magnit zanjfri havo oralig'ini o'zgartirish yo'li bilan payvandlash tokini rostlashga mo'ljallangan.

Metallni payvandlashda STN-500-1 tipli payvandlash transformatori (9.2,*b*-rasm) amalda ko'p qo'llaniladi: U_1=380 va 220 V, U_{20}= =60 V, payvandlash toki 500 A, bu tok rostlash jarayonida 800 A gacha oshishi mumkin. Chiqishidagi quvvati 15 kW, tarmoqdan oladigan quvvati 33 kV·A.

9.3. To'g'rilagich va avtomatika qurilmalari uchun transformatorlar

To'g'rilagich qurilmalari uchun transformatorlar. To'g'rilagich qurilmalari rangli metallurgiyada (masalan, Olmaliq va Navoiy kombinatlari), kimyo sanoatida (Farg'ona, Chirchiq va Navoiy kombinatlari) texnologik jarayonni, qora metallurgiyada (Bekobod metallurgiya kombinati) esa jo'valash mashina (stan)lari elektr yuritmalarini o'zgarmas tok bilan ta'minlashda, elektrotermiyada, elektrlashtirilgan temiryo'l va shahar elektr transportlarida, katta quvvatli turbo- va gidrogeneratorlar qo'zg'atish sistemasida va boshqa ayrim sohalarda foydalaniladi.



9.2-rasm. *STN-500-1 tipli payvandlash transformatorining tuzilishi (**a**) va ishining prinsipial sxemasi (sxemada reaktor ajratib ko'rsatilgan) (**b**): [**1**, **2** — tegishlicha YK va PK chulg'amlar; **3** — magnit o'tkazgich; **4**, **6** — reaktor magnit sistemasining qo'zg'almas (**4**) va qo'zg'aluvchi (**6**) qismlari; **5** — reaktor chulg'ami; **7** — qo'zg'aluvchi qismni harakatga keltirish uchun dastakli yurituvchi vint; **8** — qo'zg'aluvchi qismning titrashini kamaytirish uchun prujina; **9** — ikkilamchi chulg'am va reaktor chulg'ami qisqichi; **10** — kojux; **11** — g'ildirak; **12** — payvandlanadigan detal; **13** — elektrod; **14** — tokli simning izolatsion tutqichi]; payvandlash transformatorining tashqi xarakteristikalari (**d**): [minimal (**1**) va maksimal (**2**) zazorlar uchun;* U_{2yon} *— elektr yoyining turg'un yonishi uchun zaruriy kuchlanish].*

Katta quvvatli to'g'rilagich qurilmalari esa elektr tarmog'iga maxsus maqsadli kuch transformatorlari orqali ulanadi.

O'zgartirgich agregati maxsus maqsadli kuch transformatorlari ikkilamchi chulg'am fazalari soniga ko'ra — bir, uch, olti, 12 va 24 fazali (24 fazalini bitta transformatorda faqat ko'prik sxemasida hosil qilish mumkin) turlarga bo'linadi.

To'g'rilagich sxemalarida ishlatiladigan transformatorlarning ik-

kilamchi chulg'amiga tokni faqat bir yo'nalishda o'tkazadigan ventillar ulanadi. Bunday transformatorning o'ziga xos xususiyatlaridan biri shuki, uning turli fazalariga ulangan ventillar navbatma-navbat ishlaganligi tufayli, ayrim fazalarida yuklama qiymatining bir xil bo'lmasligidir.

Bunday transformator chulg'amlaridan nosinusoidal toklar o'tadi. Tokning yuqori garmonikalari quyidagi sabablarga ko'ra hosil bo'ladi:

1) ikkilamchi chulg'amning ayrim fazalariga ulangan ventillar tokni o'zidan davrning faqat bir qismidagina o'tkazishi;

2) to'g'rilagichning o'zgarmas tok tomoniga induktivligi katta bo'lgan tekislovchi drossel ulanganligi tufayli transformator chulg'amlaridagi tokning vaqt bo'yicha o'zgarish shakli to'g'ri burchakka yaqin bo'lishi.

O'zgartirgich qurilmalari maxsus maqsadli kuch transformatorlarida, umumiy holda, I_1 va I_2 toklarning ta'sir etuvchi qiymatlari yuqori garmonikalar ta'sirida har xil bo'lishi natijasida S_{1N} va S_{2N} hisoblash quvvatlar har xil bo'ladi. Shuning uchun ventilli to'g'rilagich transformatorining «tipaviy quvvati» tushunchasi kiritiladi (tipaviy quvvat — o'zgartirgich qurilmasi transformatorining tipiga oid bo'lgan quvvat).

O'zgartirgich qurilmalarining maxsus maqsadli kuch transformatorlarining tipaviy quvvati to'g'rilash sxemasidan bog'liq holda(masalan, 6 fazali to'g'rilash sxemasida) (9.3-rasm) quyidagicha aniqlanadi:

$$S_{tip} = 0,5\,(S_{1N} + S_{2N}) = 1,26\ P_{dN}\ , \qquad (9.1)$$

bunda $S_{1N} = 3I_{1N}U_{1f.N} = 1,045P_{dN}$, $S_{2N} = 6I_{2N}E_{2f.N} = 1,48P_{dN}$, [$P_{dN} = U_{dN}I_{dN}$ — to'g'rilagichning o'zgarmas tok tomonidagi (chiqishidagi) quvvati].

I_{1N} va I_{2N} — tegishlicha tarmoq va ventil chulg'amlarining toklari;

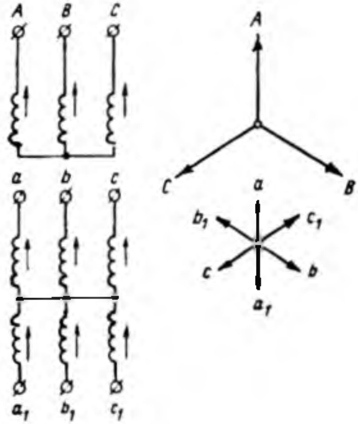
U_{1N} va $E_{2f.N}$ — tarmoq va ventil chulg'amlarining tegishlicha fazaviy kuchlanishi va EYK.

Tipaviy quvvat koeffitsienti — $K_{tip} = S_{tip}//P_{dN}$.To'g'rilagich qurilmasi uchun transformator tanlashda bu koeffitsient ma'lum bo'lishi lozim.

Yuklama nominal bo'lganda transformatorning tipaviy quvvati S_{tip}, uning chiqish quvvati P_{dN} dan katta($S_{tip} > P_{dN}$) bo'ladi.

Maxsus maqsadli kuch transformatorining quvvatiga va qo'llanish sohasiga bog'liq holda uning to'g'rilangan kuchlanishi 6 V dan bir necha ming voltgacha, to'g'rilangan tok esa 2 A dan 200 kA gacha bo'lishi mumkin.

O'zgartirgich qurilmalari uch fazali transformatorlarining tarmoq chulg'amlarini «yulduz»ga, ayrim hollarda esa «uchburchak»ka ulanadi; ventil chulg'amlari «yulduz», «qo'sh yulduz» (to'g'ri va teskari), «uchburchak-yulduz», «zigzag» sxemalarga ulanadi. Qo'sh yulduzning



9.3-rasm. *Uch fazali kuchlanishlar sistemasini olti fazaliga o'zgartirish sxemasi va uning vektor diagrammasi.*

neytrallari tenglashtiruvchi reaktor orqali ulanadi. Bunda tarmoq chulg'ami uch fazali tarmoqqa ulanganda ventil chulg'ami tomonida to'g'rilagichning ulanish sxemasiga bog'liq holda uch, olti (9.3-rasm) yoki 12 fazali to'g'rilashga imkon tug'iladi.

To'g'rilashning olti fazali sxemalari asosan quvvati 250÷4000 kW bo'lgan o'zgartirgich agregatlarida, undan katta quvvatlilarida esa 12 fazali sxemalar ishlatiladi.

Avtomatika qurilmalari uchun transformatorlar

1. Impulsli transformatorlar. Bunday transformatorlar impulsli texnika qurilmalarida elektr impulsi amplitudasini va qutbiyligini o'zgartirish, yuklama zanjiri tokining doimiy tashkil etuvchisini yo'qotish kabi vazifalarni bajarish uchun qo'llaniladi. Impulsli transformatorlar tok (yoki kuchlanish) impulsining qayta magnitlanishi rejimida ishlaydi.

Bunday transformatorlarga qo'yiladigan asosiy talab — transformatsiyalangan kuchlanish impulsining shakli imkon qadar buzilmasligi kerak.

2. Pik-transformatorlar. Elektron texnikasida boshqariladigan ventil (masalan, tiristor)ni rostlash uchun kuchlanish impulsi keskin o'tkir (piksimon) shaklda bo'lishi kerak. Bunday impulslarni sinusoidal o'zgarayotgan kuchlanish berilgan pik-transformator yordamida olish mumkin.

Pik-transformator — o'zagi magnit jihatdan kuchli to'yingan odatdagi ikki chulg'amli transformatordir. Shu sababli transformatorning

ikkilamchi chulg'amida pik (cho'qqi)simon shakldagi kuchlanish U_2 hosil bo'ladi. Magnit oqim Φ va tok i_1 nol qiymatidan o'tish paytida ikkilamchi kuchlanish maksimum (U_{2max}) qiymatga erishadi.

3. Stabillashtiruvchi transformatorlar. Bunday transformatorlar elektr yuritmada va avtomatik rostlash sistemalarida rostlanadigan kattalikning birinchi hosilasi bo'yicha teskari bog'lanishni hosil qilish uchun tabaqalashtiruvchi bo'g'inlar sifatida tez-tez foydalaniladi. Transformatorning bunday sifatda foydalanilishi, ikkilamchi chulg'am kuchlanishi U_2 ning magnit oqimi o'zgarish tezligi (dΦ/dt)ga mutanosib ravishda bo'lganligiga asoslangan.

4. Chastotani o'zgartirish uchun transformator. O'zgaruvchan tok chastotasini ikki va uch karra oshirish uchun transformator sxemalari keng qo'llanilmoqda.

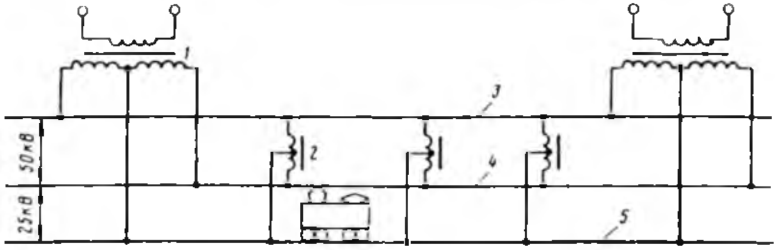
Chastotani uch karra oshirish uchun transformator sxemalari f_1 chastotali uch fazali tarmoqqa ulangan transformator o'zaklarining kuchli to'yinishi tufayli hosil bo'ladigan uchinchi garmonikadan foydalanishga asoslangan. Bunday holda EYK ning uchinchi garmonikalari katta qiymatga ega bo'lib, ikkilamchi chulg'amni «ochiq uchburchak» ko'rinishga o'tkazilsa uch marta katta ($f_3=3f_1$) bo'lgan chastotali kuchlanish manbayiga ega bo'lamiz.

9.4. Elektrlashtirilgan temiryo'l va shahar elektr transportlari uchun kuch transformatorlarining o'ziga xos xususiyatlari

Elektrlashtirilgan temiryo'l transporti (masalan, elektrovoz) *uchun kuch transformatorlari.* Elektrlashtirilgan temiryo'l transporti yuksak texnik-iqtisodiy ko'rsatkichlarga ega va ekologik jihatdan toza bo'lgan transportdir. Shu tufayli MDH mamlakatlarida, shu jumladan O'zbekistonda ham elektrlashtirilgan temiryo'l va shahar elektr transportlari keng rivojlanmoqda.

Elektrlashtirilgan temiryo'l transportida tortish («asosiy ta'minlovchi») transformatorining asosiy vazifasi elektr tarmog'i kuchlanishi U ni tortish elektr motori uchun zarur bo'lgan kuchlanishga qadar kamaytirib berishdan iborat (9.4-rasm).

2×25 kV sistemali tortish transformator podstansiyalarida bir fazali kuch transformatorlari qo'llaniladi. Ularning ikkilamchi chulg'ami har qaysisi 25 kV kuchlanishli ketma-ket ulangan ikkita seksiyadan tashkil topgan (9.5-rasm). Seksiyalar bunday ulanganda kontakt tarmog'ini 50 kV kuchlanish bilan ta'minlashga imkon beradi. Bu kuchlanish



9.4-rasm. *Elektrlashtirilgan temiryo'lning 2×25 elektr ta'minoti sistemasi tortish podstansiyasidagi ikkilamchi chulg'ami bo'lingan bir fazali maxsus maqsadli kuch transformatori: (1 — bir fazali kuch transformatori; 2 — bir fazali kuch AT; 3 — elektr energiyani ta'minlovchi maxsus liniya; 4 — kontakt tarmog'i; 5 — rels tarmog'i).*

temiryo'l bo'ylab maxsus AT punktlarida joylashtirilgan liniya AT lari yordamida rostlab turiladi.

Shahar elektr transporti kuch transformatorlari. Shahar elektr tarmoqlari xususiyatidan kelib chiqqan holda bunday maxsus maqsadli kuch transformatorlarining birlamchi kuchlanishi 6; 6,3; 10 va 10,5 kV bo'ladi.

Tramvay-trolleybuslarni elektr energiya bilan ta'minlovchi transformatorlarning ikkilamchi chulg'ami kuchlanishi U_2= 600 V bo'lgan TMP-800/10; TMP-1600/10 va TMP-3200/10 tiplari ishlatiladi.

Ikkilamchi chulg'ami kuchlanishi U_2= 825 V, quvvati 3200 kV·A gacha bo'lgan TMP-1600/10, TMP-3200/10 va TSZP tipdagi quruq maxsus maqsadli kuch transformatorlari ***metropoliten*** elektr ta'minoti uchun ishlatiladi.

9.5. Elektr o'lchash sxemalari uchun transformatorlar

Bunday transformatorlar o'zgaruvchan tok zanjirlarida elektr o'lchash asboblari (voltmetr, ampermetr, vattmetr va boshq.)ning o'lchash chegaralarini kengaytirish va yuqori kuchlanish tarmoqlarida mazkur asboblar bilan ishlash xavfsizligini ta'minlash maqsadlarida ishlatiladi. Bundan tashqari releli himoya asboblarini ulashda ham foydalaniladi. Bunday transformatorlarni ***«o'lchash transformatorlari»*** deyiladi. Ularning quvvati 5 V·A dan bir necha yuz V·A gacha bo'ladi. O'lchov transformatorlari kuchlanish va toklarni o'zgartirganda xatolik

mumkin qadar kam bo'lishining zarurligi *ularga qo'yiladigan asosiy talabdir*.

1. Kuchlanishni o'lchash sxemalari uchun transformatorlar.

Bunday transformatorlar kuchlanishi 0,38÷1150 kV bo'lgan o'zgaruvchan tok tarmoqlari kuchlanishini o'lchash sxemalarida ishlatiladi. Shu sababdan ularni «*kuchlanish transformatorlari*» deyiladi. Mazkur transformator pasaytiruvchi bo'lib, birlamchi chulg'amda kuchlanish nominal (masalan, 3; 6; 10; 35; 110 kV va boshq.) bo'lganda ikkilamchi kuchlanishi 100, 100/ $\sqrt{3}$ yoki 100/3 V bo'ladigan qilib bajariladi. Uning ikkilamchi zanjiriga voltmetr hamda vattmetr, chastota o'lchagich, energiya hisoblagich (schetchik) va fazometrlarning kuchlanish chulg'amlari ulanadi.

Bu o'lchash asboblarining elektr qarshiligi katta (taxminan 1000 O) bo'lib, kuchlanish transformatorlarining ish rejimi salt ishlash rejimiga yaqin bo'ladi. Bu holda $U_1 = E_1$; $U_0 = E_{2N}$, deb hisoblash mumkin bo'ladi, lekin $E_1 = (w_1 / w_2)E_2$ bo'lgani uchun

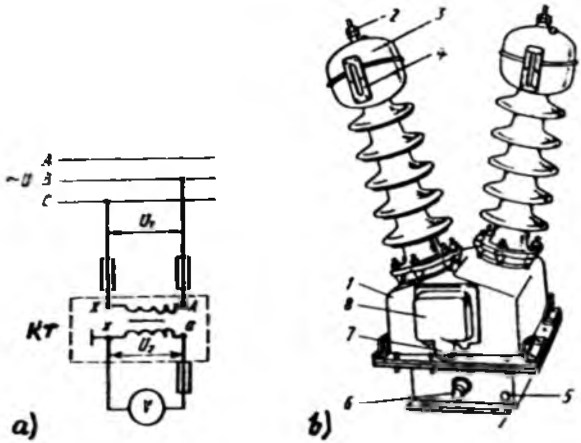
$$U_1 = (w_1 / w_2)U_2 = kU_2, \qquad (9.2)$$

bunda $k = w_1/w_2$ - transformatsiyalash koeffitsienti.

Kuchlanish transformatorining xatoligi birlamchi (U_1) va ikkilamchi (U_2) chulg'am kuchlanish vektorlari orasidagi siljish fazasiga bog'liq holda o'zgaradi. Ko'chirilmaydigan (statsionar) kuchlanish transformatorlarini uchta (0,5; 1 va 3), laboratoriya kuchlanish transformatorlarini esa 4 ta (0,05; 0,1; 0,2; va 0,5) aniqlik klassga bo'ladilar.

Kuchlanish transformatorlari bir fazali va uch fazali qilib tayyorlanadi. Kuchlanish U =3000 V gacha quruq qilinib, U > 3000 V bo'lganda esa moyli (moy bilan sovitiladigan) qilinadi. 9.5-rasmda NOM-35 tipli kuchlanish transformatori (*b*) va uni tarmoqqa ulash sxemasi (*a*) ko'rsatilgan.

Elektr xavfsizligini ta'minlash maqsadida transformator ikkilamchi chulg'amining chiqish uchlaridan biri va transformator qoplamasi (kojuxi) zaminlanadi, ya'ni yerga tutashtiriladi.



9.5-rasm. *Kuchlanishi 35 kV bo'lgan tarmoqqa mo'ljallangan NOM-35 tipli kuchlanish transformatorini tarmoqqa ulash sxemasi (a) va uning tashqi ko'rinishi (b): (1 — korpus; 2 — yuqori kuchlanishli tarmoqdan ulanadigan sim uchun qisqich; 3 — o'tish izolatorining kengaytirgichi; 4 — moy ko'rsatkich; 5 — zaminlash uchun bolt; 6 — moyni to'kish uchun tiqinli teshik; 7 — ikkilamchi chulg'am uchlari chiqarilgan izolatsion taxtachaning qopqog'i va 8 — o'lchash asboblariga sim ulash uchun shtutser (uchlariga rezba ochilgan biriktiruvchi qism); KT — kuchlanish transformatori.*

2. Tokni o'lchash sxemalari uchun transformatorlar

Bunday transformatorlar katta qiymatli toklarni oddiy ampermetr bilan o'lchash uchun hamda vattmetr, energiya hisoblagich (schetchik) va fazometrlarning tok chulg'amlarini ulashda ishlatiladi. Shu sababdan ularni *«tok transformatorlari»* deyiladi. Tok transformatorining birlamchi chulg'ami kesim yuzasi katta bo'lgan o'tkazgich (sterjen)dan yasalib, tarmoqqa ketma-ket ulanadi (9.7-rasm). Chulg'amlardagi o'ramlar shunday tanlanadiki, bunda birlamchi chulg'amning toki nominalga teng bo'lganda, ikkilamchi zanjirdagi tok 5 A bo'ladigan qilib bajariladi.

Tok transformatorlarining ish rejimi qisqa tutashuv rejimiga yaqin bo'ladi va ular uchun toklar tenglamasi quyidagicha yoziladi:

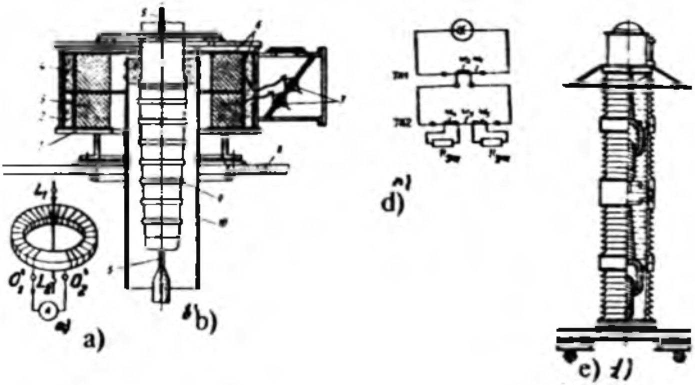
$$\underline{I}_1 = -\underline{I}'_2 = -(w_2/w_1)\underline{I}_2 = \underline{I}_2/k. \qquad (9.3)$$

Demak, ikkilamchi tok I_2 va transformatsiyalash koeffitsienti *k* ma'lum bo'lganda birlamchi tok I_1 ni aniqlash mumkin ekan.

Tok transformatorlarini 5 ta aniqlik klassiga bo'ladilar: statsionar (ko'chmaydigan) turlari — 0,2; 0,5; 1; 3 va 10, laboratoriya tok transformatorlari esa — 0,01; 0,02; 0,05; 0,1 va 0,2. Bu keltirilgan raqamlar tokning nominal qiymatidagi tok xatoligidir.

Nominal kuchlanish U ≥ 220 kV bo'lganda tok transformatori kaskad sxemasi bo'yicha, ya'ni ikki pog'onali qilib bajariladi (9.6,*e*-rasm). Bu rasmda ko'rsatilgan kaskadli tok transformatorining har bitta pog'onasini kuchlanishi 250 $\sqrt{3}$ / kV bo'lgan tok transformatori tashkil etadi.

Birinchi pog'onadagi ikkilamchi chulg'am ikkinchi pog'onaning birlamchi chulg'amini tok bilan ta'minlaydi. Yuqori kuchlanishda ikki pog'onali tok transformatorining bir pog'onaliga nisbatan tannarxining taxminan 2 marta kamligi uning afzalligi bo'lsa, kaskad sxemada chulg'amlar qarshiliklarining oshishi tufayli tok transformatori xatoligining ko'payishi esa uning kamchiligi hisoblanadi. Tok transformatorini tarmoqqa ulashda uning qoplamasi va 2-chulg'amining



9.7-rasm. *Kuchlanishi 110 кV bo'lgan kuch tansformatori bakining ichiga o'rnatilgan tok transformatorining ulanish sxemasi (a): L_1 va L_2 — birlamchi chulg'am uchlari; O'_1 va O'_2 — ikkilamchi chulg'am uchlari; b) tok transformatorining konstruksiyasi: 1 — kiritgichning o'tish flanetsi (birlashtiruvchi qismi); 2 — qora qayindan yasalgan plastina; 3, 4 — tok transformatorlari; 5 — birinchi chulg'am vazifasini bajaruvchi o'tkazgich; 6 — elektrokarton izolatsiya; 7 — ikkilamchi chulg'am o'tish izolatori qisqichi; 8 — bak qopqog'i; 9 — moy to'ldirilgan kiritgich; 10 — qog'oz-bakelitli silindr; d — kaskadli tok transformatorining sxemasi; e — kaskadli tok transformatori.*

chiqish uchlaridan biri yerga ulanadi. Tok transformatori normal ishlash jarayonida, uning ikkilamchi chulg'ami uzib qo'yilmasligi kerak, aks holda ikkilamchi chulg'am toki $I_2 = 0$ bo'lib, birlamchi chulg'am toki I_1 esa o'zining ilgarigi katta qiymatini o'zgartirmay uning hosil qilgan magnit oqimi ikkilamchi chulg'amda katta EYK hosil qiladi. Bu esa magnit isroflarining oshib ketishi sababli tok transformatorining me'yoridan ortiq qizib ketishiga olib keladi.

Tok transformatorini tarmoqdan uzishda, dastlab uning ikkilamchi chulg'ami shunt qilinib, o'lchash asboblari ajratiladi.

Nazorat savollari:

1. Payvandlash transformatorining tuzilishi va ishlash prinsipini so'zlab bering.

2. Elektrlashtirilgan temiryo'l transporti kuch transformatorini so'zlab bering.

3. Elektr o'lchash sxemalari uchun transformatorning ahamiyati nimadan iborat?

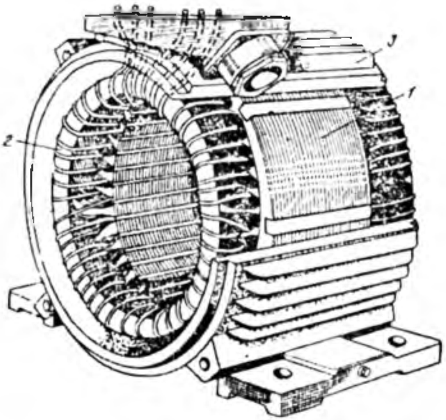
4. Avtomatik qurilmalarda qanday maxsus transformatorlar ishlatiladi?

II BO'LIM. O'ZGARUVCHAN TOK MASHINALARI NAZARIYASINING UMUMIY MASALALARI

Elektr energiyani ishlab chiqarish va undan foydalanish sohalarida o'zgaruvchan tok mashinalari hozirgi zamon elektr energetikasining asosini tashkil etadi. Bu elektr mashinalarining deyarli barchasi (asinxron va sinxron mashinalar) kollektorsizdir. Bu mashinalar ish xossalari bilan farq qilsa ham konstruksiyasida va ishchi chulg'ami — stator chulg'ami bilan bog'liq bo'lgan jarayonlar va hodisalarga tegishli ularning nazariyasi asosida ayrim umumiy masalalar yotadi. Shu sababli asinxron va sinxron mashinalarni batafsil o'rganishdan oldin, mazkur mashinalar nazariyasining umumiy masalalari bilan tanishish maqsadga muvofiqdir.

Asinxron va sinxron mashinalar boshqa elektr mashinalari singari E. Lens kashf qilgan qaytarlik xossaga egadirlar, ya'ni ularning har qaysi generator va motor rejimlarda ishlay oladilar.

Kitobning mazkur bo'limi kollektorsiz o'zgaruvchan tok mashinalari aktiv qismlarining konstruksiyasi, stator chulg'amlarining tuzilishi va ularda hosil bo'ladigan EYK va MYK larni o'rganishga bag'ishlangan.

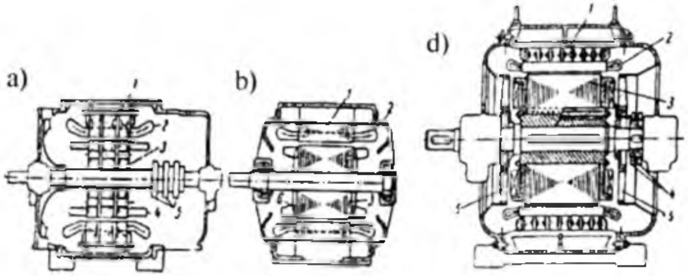


II.1-rasm. *O'zgaruvchan tok mashinasining statori: 1 — stator po'lat o'zagi; 2 — stator chulg'ami va 3 — korpus (tana).*

10-BOB. O‘ZGARUVCHAN TOK MASHINALARI KONSTRUKSIYASI VA NAZARIYASINING UMUMIY ELEMENTLARI

10.1. O‘zgaruvchan tok mashinalarining aktiv qismlariga oid umumiy ma’lumotlar

O‘zgaruvchan tok mashinalari ikkita turga, ya’ni *asinxron va sinxron* mashinalarga bo‘linadi. Bu mashinalar qo‘zg‘almas qismi *stator* va uning ichiga podshipnik qalqon(shchit)lari vositasida mahkamlanib aylanish imkoniyatiga ega bo‘lgan *rotordan* iborat. Stator va rotor bir-biridan *havo oralig‘i* bilan ajratilgan bo‘ladi. Havo oralig‘ining o‘lchami mashinaning ish xossalariga jiddiy ta’sir qiladi.



10.1-rasm. *Uch fazali o‘zgaruvchan tok mashinalarining konstruktiv sxemalari: faza rotorli (a) va qisqa tutashgan rotorli (b) asinxron motorlar (bularda: 1 – stator po‘lat o‘zagi; 2 – uch fazali stator chulg‘ami; 3 – rotor o‘zagi; 4 – rotorning faza chulg‘ami; 5 – ishga tushirish qarshiligiga ulash uchun kontakt.*

*Halqalar; **6** – rotorning qisqa tutashgan chulg‘ami hamda ayon qutbli sinxron generator (**d**) (bunda: **1** – stator o‘zagi; **2** – uch fazali stator chulg‘ami; **3** – o‘zgarmas tok chulg‘amli rotor qutblari; **4** – o‘zgarmas tok manbasi bilan ulash uchun halqalar; **5** – ventilatorlar)*

Masalan, sinxron mashinalarda u o‘ta yuklanish qobiliyatini oshirsa, asinxron mashinalarda havo oraliqning katta bo‘lishi ularning quvvat koeffitsienti *cos*φ ni va aylantiruvchi momenti M ni keskin kamaytiradi.

An’anaviy o‘zgaruvchan tok mashinalari – asinxron va sinxron mashinalar bir-biridan rotorining tuzilishi bilan farq qilsa ham, *ularning statorlari asosan bir xil konstruksiyaga ega* bo‘lib (11.1-rasm), ishlash

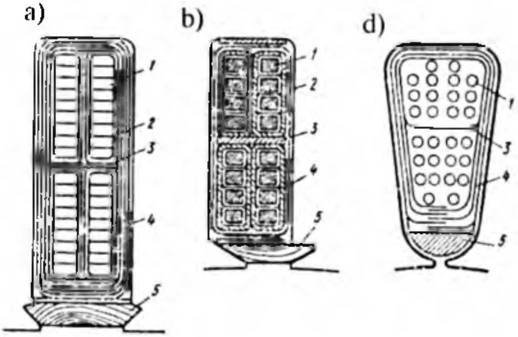
prinsipi va nazariyasida anchagina *o'xshashlik jihatlari* mavjuddir. Bulardagi fizik jarayonlarning umumiyligi ularning nazariyasi o'xshashligini, ko'p fazali o'zgaruvchan tok chulg'amlari konstruksiyasi hamda sinxron va sinxron mashinalar statorlarining tuzilishi prinsipining o'xshashligini keltirib chiqaradi.

Magnit o'tkazgich va chulg'amlar o'zgaruvchan tok mashinalarining *aktiv qismlari* hisoblanadi. O'zgaruvchan magnit oqimi o'tadigan mashinaning magnit o'tkazgichi, ya'ni asinxron mashinaning stator va rotor hamda sinxron mashinaning stator po'lat o'zaklari elektrotexnik izotropli (ya'ni magnit o'tkazuvchanligi po'latning jo'valanish yo'nalishiga deyarli bog'liq bo'lmagan) sovuqlayin jo'valangan po'lat (plastinka) tunukalaridan yig'iladi. Stator o'zagining ichki (havo oralig'iga yaqin) tomoniga *chulg'am joylashtirish uchun* shtamplash stanogi vositasida po'lat plastinkalarga bir xil andozali pazlar o'yiladi.

Elektr mashinalarining rotori valga mahkamlangan podshipniklar vositasida aylanadi. Quvvati 1000 kW gacha bo'lgan elektr mashinalarida podshipnik qalqonida joylashtiriladigan *sharikli va rolikli dumalash podshipniklari*, R $\geq$ 1000 kW bo'lganda esa mashina korpusidan tashqarida joylashtiriladigan tayanchda *sirpanish podshipniklari* qo'llaniladi.

Masalan, sinxron mashinalarda u o'ta yuklanish qobiliyatini oshirsa, asinxron havo oralig'i tomonidagi pazlarda rotor chulg'ami joylashtiriladi.

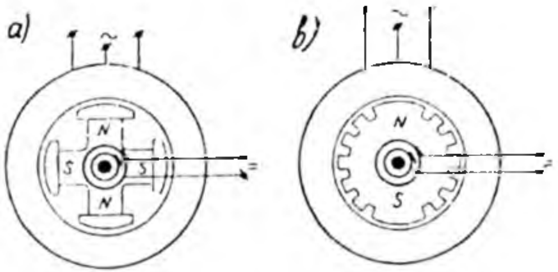
Po'lat o'zak tishlari va pazlarining shakllari mashina tipiga va uning quvvatiga bog'liq bo'ladi. *Katta quvvatli* mashinalarda stator va rotor



10.2-rasm. *Statorning ochiq (a), yarim ochiq (b) va yarim yopiq (d) shaklli pazlari: 1 — o'tkazgichlar; 2 — qatlam izolatsiyasi; 3 — qatlamlararo isolyatsiya; 4 — paz izolatsiyasi; 5 — pona.*

chulg'amlarini to'g'riburchak kesimli o'tkazgichlardan bajariladi; bu holda o'tkazgichlarni pazda yaxshi joylashtirish va ishonchli izolatsiyalashni ta'minlash imkoniyati yaxshilangani sababli to'g'riburchak shaklli *ochiq pazlar* qo'llaniladi (10.2,*a*-rasm). *Kam va o'rta quvvatli* elektr mashinalarida rotor va stator chulg'amlari odatda dumaloq kesimli simlardan yasalib, bunday mashinalarda oval (tuxumsimon cho'ziq) yoki trapetsiya shakldagi *yarim yopiq* pazlar (10.2,*d*-rasm) qo'llaniladi. Ayrim hollarda to'g'riburchak kesimli sim ishlatilganda *yarim ochiq* pazlar qo'llaniladi (10.2,*b*-rasm).

Sinxron mashinalar rotorining konstruksiyasiga ko'ra: ayon qutbli va noayon qutbli turlarga bo'linadi.



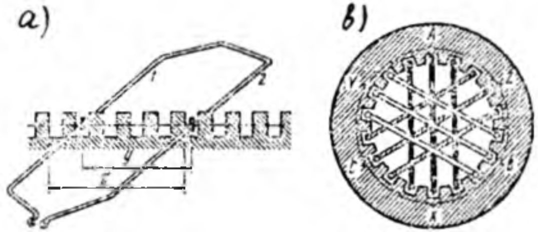
10.3-rasm. *Sinxron mashinalarning asosiy turlari: a — ayon qutbli, **b** — noayon qutbli.*

(*Noayon qutbli* sinxron mashina (SM)larda rotor massiv yaxlit quyilgan) qilib bajariladi (10.3,*b*-rasm), chunki uning pazlarida magnit oqimi rotorga nisbatan qo'zg'almas bo'lgan qo'zg'atish chulg'amli qutblar joylashgan. *Mashina havo orlig'ida magnit induksiyaning taxminan sinusoidal tarqalishini ta'minlash maqsadida,* qo'zg'atish chulg'ami o'tkazgichlari rotor doirasining 2/3 qismidagi pazlarda taqsimlangan holda joylashtirilgan bo'ladi. Shu maqsadda *ayon qutbli* sinxron mashinalarda qutb uchligiga maxsus shakl beriladi, ya'ni uning chekkalaridagi havo oraliq δ_{max} qutb o'rtasidagi δ ga nisbatan 1,5÷2 baravar katta qilib tayyorlanadi.

Ayon qutbli sinxron mashinalarda rotorining markazdan qochirma kuchlari katta bo'lganligidan qutblar soni ($2p \geq 4$) qilib tayyorlanadi (10.3,*a*-rasm), chunki $n = n_1 = 60\ f/\ p$ ifodaga binoan umumiy qo'llanishdagi o'zgaruvchan tok chastotasi f_1 = 50 Hz = const bo'lishi uchun rotorning aylanish chastotasi kam bo'lgan hollarda qutblar sonini oshirish zarur bo'ladi.

10.2. O‘zgaruvchan tok mashinalarining stator chulg‘ami va uning tarkibiy qismlari

O‘zgaruvchan tok mashinalarida stator chulg‘ami po‘lat o‘zak pazlariga ma’lum tartibda joylashtiriladi. Bir xil pazlarda joylashgan o‘ramlar bir-biri bilan ketma-ket ulanib *g‘altak (seksiya)larni* hosil qiladi (10.4,*a*-rasm). Qo‘shni pazlarda joylashgan g‘altaklar ketma-ket ulanib *g‘altaklar guruhini* hosil qiladi. Ular mashinaning bitta fazasi va juft qutbiga to‘g‘ri keladi. Chulg‘amning har bir fazasi AX, BY, CZ bir necha parallel (faza toki katta bo‘lgan hollarda) yoki ketma-ket ulangan g‘altaklar guruhidan tashkil topadi.



10.4-rasm. *Ikkita o‘tkazgichdan hosil bo‘lgan o‘ram (a) va uch fazali chulg‘am g‘altaklarining statorda joylashishi (b)*

O‘zgaruvchan tok chulg‘amlarini tushuntirishda metodik mulohazalar nuqtayi nazaridan kitobda fazaviy chulg‘am uchlarining boshlari A,B,C, oxirlari esa X,Y, Z lotin harflari bilan belgilanadi. Ta’kidlash lozimki, bunday uslubiy yondashish chulg‘amlarni nazariy o‘rganishda yaqqollikni ta’minlaydi (amalda esa standartda belgilanganlarga rioya qilinadi).

Ilgari uch fazali stator chulg‘amining uchlari quyidagicha: C1–C4 (1-faza), C2–C5 (2-faza), C3–C6 (3-faza) belgilangan. Xalqaro standartga moslashtirib ishlab chiqilgan standart (GOST 26772-85)ga muvofiq 1.01.1987 dan boshlab MDH mamlakatlari elektr mashinasozligi zavodlarida ishlab chiqarilayotgan o‘zgaruvchan tok mashinalari stator chulg‘ami fazalarining boshi va oxirlariga ochiq sxema uchun yangicha belgilanish joriy qilingan, ya’ni: U1–U2 (1-faza), V1–V2 (2-faza), W1–W2 (3-faza), boshqa belgilanishlar esa 10.1-jadvalda keltirilgan. Statorning fazaviy chulg‘amlari yulduz (Y) yoki uchburchak (Δ) usulida ulanishi mumkin, shu maqsadda klemmalar qutichasida chulg‘am uchlarining boshi va oxiri ma’lum tartibda joylashtiriladi.

Chulg‘amning *eng oddiy elementi o‘ram* (10.4,*a*- rasm) hisoblanadi. O‘ram bir-biridan yakor aylanasida chulg‘am qadami “y” ga teng bo‘lgan

10.1-jadval

O'zgaruvchan tok mashinalari chulg'am fazalari va chiqish uchlarining ilgarigi va yangi belgilanishiga oid ma'lumot

Chulg'amning nomi va ulanish sxemasi	*Chulg'amning chiqish uchlari soni*	*Fazasining yoki chiqish uchining nomi*	*O'zgaruvchan tok mashinalari chulg'am fazalari va chiqish uchlarining belgilanishi*			
			01.01.1987-yilgacha ishlab chiqarilgan va modernizatsiya qilinadigan mashinalar uchun (***Ilgarigi***)		***01. 01. 1987-yildan keyin*** ishlab chiqarilgan mashinalar uchun (***Yangi***)	
			Boshi	Oxiri	Boshi	Oxiri
Stator chulg'ami: *a*) ochiq sxema	6	Birinchi faza	C1	C4	U1	U2
		Ikkinchi faza	C2	C5	V1	V2
		Uchinchi faza	C3	C6	W1	W2
b) "yulduz" ulanish	3 yoki 4	Birinchi faza	C1		U	
		Ikkinchi faza	C2		V	
		Uchinchi faza	C3		W	
		Nol nuqtasi	0		N	
d) "uchburchak" ulanish	3	Birinchi uchi	C1		U	
		Ikkinchi uchi	C2		V	
		Uchinchi uchi	C3		W	
SM larning qo'zg'atish chulg'ami	2		I1	I2	F1	F2
Faza rotorli asinxron motorning rotor chulg'ami *a*) ochiq sxema	6	Birinchi faza	–	–	K1	K2
		Ikkinchi faza	–	–	L1	L2
		Uchinchi faza	–	–	M1	M2
b) "yulduz" ulanish	3 yoki 4	Birinchi faza	P1		K	
		Ikkinchi faza	P2		L	
		Uchinchi faza	P3		M	
		Nol nuqtasi	0		Q	
d) "uchburchak" ulanish	3	Birinchi uchi	–		K	
		Ikkinchi uchi	–		L	
		Uchinchi uchi	–		M	

(*10.1-jadvalga izoh:* "—"belgisi ilgarigi standartda bo'lmaganligini bildiradi).

masofadagi pazlarda joylashgan ikkita o'tkazgich (sim)ning ketma-ket ulanishidan hosil bo'ladi. Bu masofa taxminan qutb bo'linmasi $y \approx \tau = \pi D/(2p)$ ga teng bo'ladi (bu yerda: D — statorning ichki diametri; 2p — qutblar soni).

Qutb bo'linmasi τ ni pazlar soni Z orqali ham aniqlash mumkin, bu holda chulg'am qadami:

$$y = \tau = Z / (2p), \qquad (10.1)$$

Agar $y = \tau$ bo'lsa, chulg'am *diametral* yoki *to'la* qadamli, $y < \tau$ bo'lsa — ***qisqartirilgan qadamli***, $y > \tau$ bo'lganda esa *uzaytirilgan qadamli* ***chulg'am*** deyiladi.

Qo'shni pazlarda joylashgan bitta g'altak guruhidagi g'altak tomonlari q ta pazlarni egallab fazoviy siljish burchagi

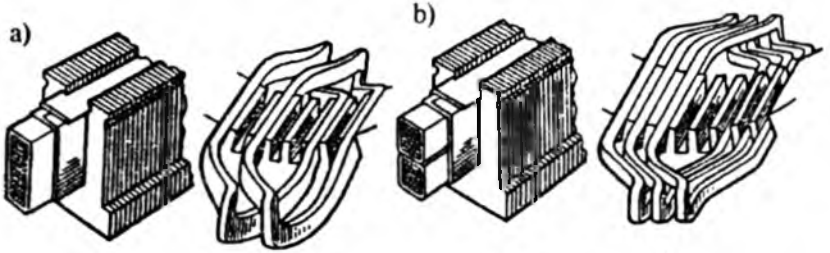
$$\alpha = 2\pi \cdot p \cdot q / Z \qquad (10.2)$$

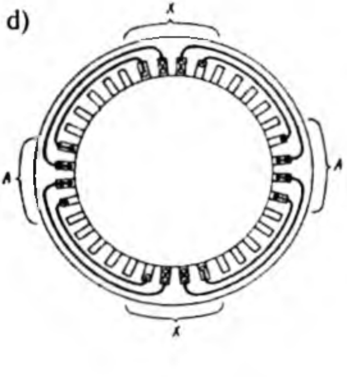
bilan faza zonasini hosil qiladi:

$$q = Z / (2p \cdot m), \qquad (10.3)$$

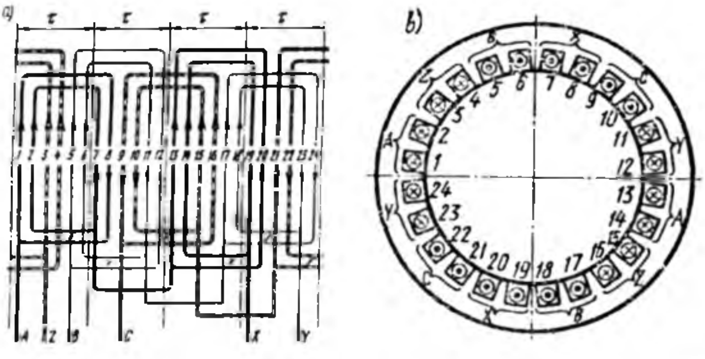
bu yerda m — fazalar soni.

10.4,*b*-rasmda ko'rsatilgan stator chulg'amining har bir fazasi AX, BU, CZ uchta g'altakdan tashkil topgan bo'lib, tomonlari uchta pazlarda joylashgan, ya'ni q =3. Umuman uch fazali chulg'amda bitta qutb





10.5-rasm. *Bir qatlamli (**a**) va ikki qatlamli (**b**) chulg'amlarning g'altaklarda joylashishi hamda uch fazali mashina bir-ikki qatlamli stator (Z= 36, 2p= 4, q= 3) chulg'amida «A» fazasi g'altaklarining joylashish sxemasi (**d**).*



10.6-rasm. *Uch fazali bir qatlamli konsentrik chulg'am sxemasi ($Z=24$, $2p=4$, $q=2$, $a=1$) (**a**) va statorda g'altaklarning joylashishi (**b**).*

bo'linmasida 3q pazlar joylashgan bo'ladi, q=1 bo'lganda esa har bir qutb tagida bir fazaning bitta g'altagi joylashgan bo'ladi.

Seksiya tomonlarining pazlarda joylashish tartibi va pazlardan tashqari qismining joylashtirilishiga qarab chulg'amlar *bir qatlamli*, *ikki qatlamli* va *bir-ikki (kombinatsiyalangan) qatlamli* bo'ladi. Agar pazda seksiyaning faqat bitta tomoni joylashgan bo'lsa – *bir qatlamli* (10.5,*a*-rasm), pazda seksiyaning yuqorgi qatlami va boshqa seksiyaning pastki qatlami ustma-ust joylashgan bo'lganda esa – *ikki qatlamli* (10.5,*b*-rasm) chulg'am deyiladi. *Bir-ikki qatlamli* konsentrik chulg'amlarda (10.5,*d*-rasm) bir qatlamli chulg'am g'altaklarini pazlarga joylashtirishda mexanizatsiyani qo'llashning yengilligi va ikki qatlamli chulg'amiarda esa qisqartirilgan qadam qo'llash mumkinligi kabi afzalliklarini o'zida mujassamlashtirgan. Bunday chulg'amlar quvvati 15÷100 kW ($q \leq 6$) bo'lgan mashinalarda qo'llaniladi.

Bir qatlamli chulg'amni qisqartirilgan qadamli qilib bo'lmaydi, bu ularning *asosiy kamchiligi* hisoblanadi. Chulg'am qadami qisqartirilmagan bo'lsa mashina havo oralig'idagi magnit maydonning shaklida yuqori garmonikalarning bo'lishi qo'shimcha isroflarning oshishiga, mexanik xarakteristikada o'pirilish (ya'ni keskin pasayish)lar vujudga kelishiga va g'uvillashining oshishiga olib keladi.

Lekin o'zining oddiyligi, arzonligi va chulg'am seksiyalarini pazlarga joylashtirish texnologiyasida mexanizatsiyani to'la qo'llash mumkinligi tufayli bir qatlamli chulg'amlar kam quvvatli (ya'ni quvvati 10÷15 kW

gacha bo'lgan) mashinalarning stator chulg'ami uchun keng qo'llanilmoqda. 10.6-rasmda bir qatlamli chulg'amning amalda keng qo'llaniladigan turi, ya'ni bir qatlamli konsentrik chulg'am sxemasi ko'rsatilgan (Z = 24, 2p = 4, q = 2, *a*=1). O'zgaruvchan tok elektr mashinalarining chulg'amlari fazalar soniga ko'ra bir, ikki va uch fazali bo'lishi mumkin; seksiyalarining shakliga va ulanishiga ko'ra esa *sirtmoqsimon* va *to'lqinsimon* turlarga bo'linadi; ularning qadamlari tegishlicha 10.7,*a* va 10.7,*b*-rasmlarda ko'rsatilgan.

Ikki qatlamli sirtmoqsimon chulg'amlar turbogeneratorlarda va umumiy maqsadli o'zgaruvchan tok elektr mashinalarida keng qo'llaniladi.

Mashinaning har bitta qutbiga va fazasiga to'g'ri keladigan pazlar soni q butun songa teng bo'lgan sirtmoqsimon chulg'am umumiy maqsadli o'zgaruvchan tok mashinalarida keng qo'llanishini e'tiborga olib quyidagi misolda ko'rib chiqamiz.

10.1-m i s o l. Berilganlar, ya'ni: pazlar soni Z =24 va qutblar soni 2r =4 bo'lgan uch fazali (m =3) chulg'amni hisoblash, yoyma sxemasini chizish va uning asosida parallel shoxobchalar hosil qilish hamda chulg'amning pazlardagi EYK lar yulduzini qurish talab etiladi.

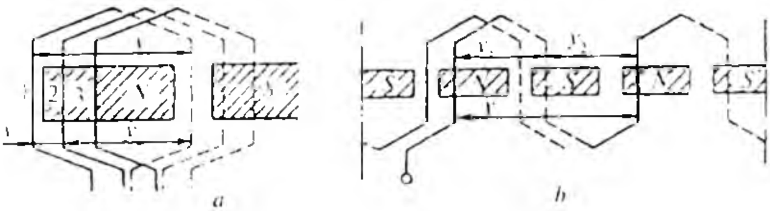
Bu holda mashinaning har bitta qutbiga va fazasiga to'g'ri keladigan pazlar soni "q" quyidagicha topiladi:

$$q = Z / (2p \cdot m) = 24 / (4 \cdot 3) = 2. \qquad (10.4)$$

Tish bo'linmasida ifodalangan qutb bo'linmasi quyidagicha topiladi:

$$\tau = Z / (2p) = 24 / (2 \cdot 2) = 6. \qquad (10.5)$$

O'zgaruvchan tok mashinada MYK (yoki EYK) ning o'zgarish shaklini sinusoidal shaklga yaqinlashtirish maqsadida chulg'amning qadami taxminan $y \approx 0{,}833 \cdot \tau$ ga teng bo'lgan qisqartirilgan qadam tanlanadi. Shu sababli chulg'amning tish bo'linmasida ifodalangan qadami quyidagiga teng bo'ladi:



10.7-rasm. *Sirtmoqsimon (a) va to'lqinsimon (b) chulg'amlarning seksiyalari.*

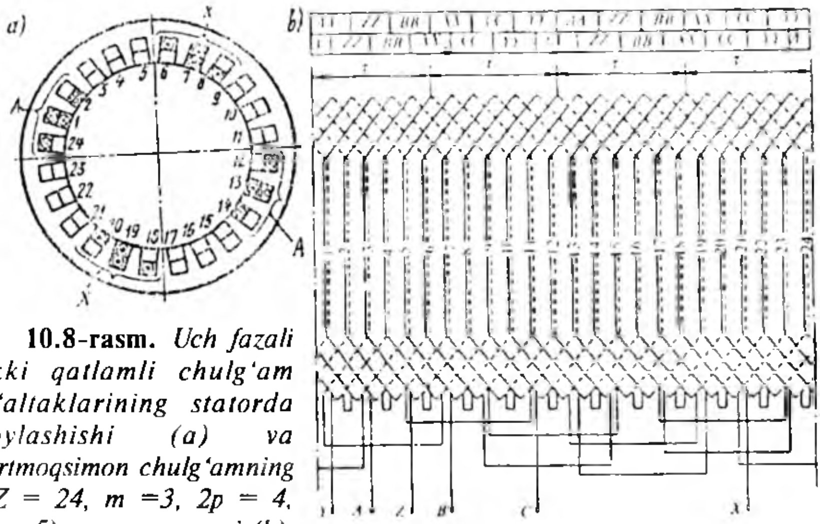
$y = 0,833 \cdot \tau = 0,833 \cdot 6 = 5.$

Bu chulg'amning sxemasi 10.8-rasmda ko'rsatilgan. *Bu chulg'am sxemasining tuzilishi quyidagicha tushuntiriladi*: dastavval pazlarning ustida joylashgan g'altaklar tomonlarini har qaysi zonada ikkita pazda joylashgan tomonni (q= 2) faza zonalari bo'yicha taqsimlab chiqamiz. Agar 1 va 2-pazlarni "A" faza zonasi uchun ajratilsa, u holda "B" faza zonasiga 5 va 6-pazlarni ajratish kerak bo'ladi, chunki "B" faza "A" fazaga nisbatan 120° ga siljigan bo'ladi, ya'ni 2 ta zona 60° dan yoki 4 ta ($120°/\alpha = =120° / 30° = 4$) pazga ciljigan bo'lishi kerak (1+4 = 5; 2+4 = 6). «C» faza zonasi ham «B» faza zonasiga nisbatan 120° ga siljib, 5+4=9 va 6+4 =10 pazlarni egallaydi. Keyingi qo'sh qutb bo'linmasi davomida ham (pazlar 13÷24) "A", "B" va "C" zonalarning almashib kelishi shunday tartibda amalga oshadi ("A" faza zonasiga 13, 14-pazlar; "B" faza zonasiga 17, 18-pazlar; "C" faza zonasiga 21, 22-pazlar to'g'ri keladi). Demak, *ustki qatlam shu tarzda taqsimlanadi*.

Boshqa faza zonalarini ham "A", "B", "C" fazalar bo'yicha taqsimlab chiqamiz va ularni mos ravishda "X", "Y", "Z" bilan belgilaymiz. Bunda "A" fazaga tegishli "X" zona uchun "A" zonaga nisbatan τ =6 taga siljigan pazlarni ajratamiz, ya'ni 1+6 =7, 2+6=8, 13+6 =19, 14+6 = 20-pazlar. Xuddi shunday "Y" zonaga 5+6 =11, 6+6 =12, 17+6 =23, 18+6 = 24-pazlarni, "Z" zona uchun esa 9+6 =15, 10+6 =16, 21+6 = 27−24 =3, 22+6= 28 −24 = 4-pazlarni ajratamiz. Shu tarzda pazlarning ustki qatlamidagi g'altaklar tomonlarini fazalar zonasi bo'yicha tarqalishiga ega bo'lamiz.

"A", "B", "C" va "X", "Y", "Z" zonalar orasidagi farq shundaki, g'altaklarning tomonlaridagi EYK lar faza bo'yicha 180° siljigan bo'ladi, chunki ular magnit maydonda bir yoki toq son qutb bo'linmasiga siljigan bo'ladi. Ko'rayotgan misolimizda qadam bir tish bo'linmasiga qisqartirilgan, shuning uchun pazlarning pastki qatlamidagi g'altaklar tomonlari, 10.8-rasm yuqori qismining pastki qatorida ko'rsatilganidek, chap tomonga bir tish bo'linmasiga siljiydi. Pastki tomonlarni zonalar bo'yicha bo'lib chiqmasa ham bo'ladi, chunki g'altaklarning pazlardan tashqari qismlarini chizganda o'z-o'zidan kelib chiqadi.

Shuni ta'kidlash lozimki, 10.8-rasmdagi "A", "Z", "B", "X", "C", "Y" zonalarning har bir zonada *q* ta paz bilan qo'sh qutb bo'linmasi davomida almashib kelishi faza zonasi 60° bo'lgan har qanday uch fazali chulg'am uchun taalluqli bo'lib, yuqoridagi hisoblashlarga hojat yo'qdir.



10.8-rasm. *Uch fazali ikki qatlamli chulg'am g'altaklarining statorda joylashishi (a) va sirtmoqsimon chulg'amning (Z = 24, m =3, 2p = 4, y = 5) yoyma sxemasi (b).*

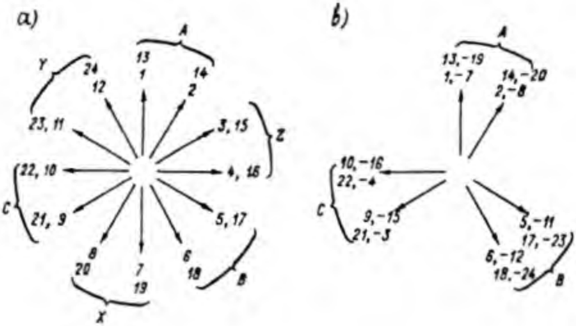
Faza bo'yicha pazlarning tarqalishini chulg'am pazlaridagi g'altak (yoki o'tkazgich)larning EYK lari yulduzi (10.9-rasm) yordamida ham amalga oshirish mumkin.

Qo'shni pazlar o'tkazgichlaridagi EYK larning faza bo'yicha siljish burchagi α ko'rilayotgan misolda quyidagicha topiladi:

$\alpha = p \cdot 360°/ Z = 2 \cdot 360°/ 24 = 30°$.

Pazlardagi g'altaklar tomonlari EYK larining vektorlari qo'sh qutb bo'linmasi davomida aylanib kelishi (1÷12 vektorlar) EYK vektorlarining yulduzi *q* butun son bo'lganda, mos keluvchi pazlarning (1 va 1+12 =13 hamda shunga o'xshashlar) EYK lari ustma-ust tushganliligi uchun faza bo'yicha takrorlanadi (10.9-rasm). Agarda birinchi ikki vektorni "A" zonasi uchun (1; 2 va 13; 14-vektorlar) ajratsak (10.8-rasm), u holda "B" va "C" zonalardagi vektorlar "A" zona vektorlariga nisbatan 120° va 240° ga siljigan bo'ladi. "X", "Y", "Z" zonalarining vektorlari esa "A", "B", "C" zonalar vektorlariga nisbatan 180° ga siljigan bo'ladi. Natijada 10.8-rasmdagi yuqori qatorda ko'rsatilgan zonalar bo'yicha pazlarning tarqalishiga ega bo'lamiz.

10.8-rasmdagi sxemada har bir paz uchun ikkita o'tkazgich (g'altak tomonlari) chizilgan. Ularning chap tomonlari yuqori qatlamga, o'ng tomonlari esa pastki qatlamga joylashgan deb hisoblaymiz. g'altaklarni



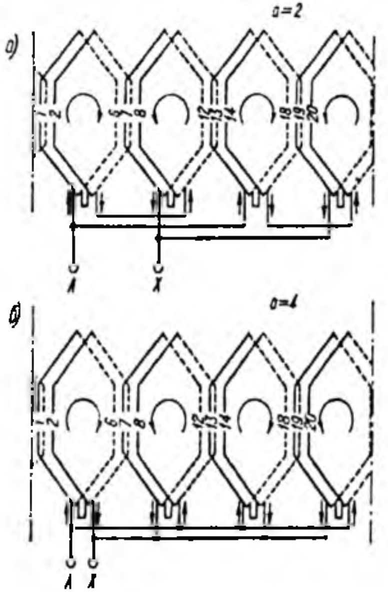
10.9-rasm. *10.8-rasmda tasvirlangan chulg'amning pazlardagi o'tkazgichlar EYK lari (a) va g'altaklar EYK lari yulduzlari (b).*

yuqori tomonlaridan boshlab nomerlab chiqamiz. Qo'shni pazlardagi g'altaklarning EYK lari ham 30° ga siljigan bo'ladi, demak, pazlardagi g'altaklar o'tkazgichlarining EYK lari yulduzini (10.9,*a*-rasm) g'altaklar EYK lari yulduzi (10.9,*b*-rasm) deb qarash mumkin. Har bir g'altak guruhlari chegarasida q =2 g'altaklar ketma-ket ulanadi.

Shunday qilib, "A" faza uchun (10.9,*a*-rasm) 4 ta, ya'ni 1—2, 7—8, 13—14 va 19—20-g'altaklar guruhiga ega bo'lamiz. Barcha guruh EYK lari bir-biri bilan qo'shilishi uchun ular ketma-ket ulangan, 7—8 va 19—20-guruhlar esa 1—2 va 13—14 (1—2-guruh oxirlari 7—8-guruh oxirlari bilan ulangan) guruhlarga nisbatan teskari bo'ladi (10.9,*b*-rasmda *minus* "—" ishorali paz raqamlari). Boshqa fazalardagi guruhlarning ulanishi ham xuddi shunday usul bilan amalga oshiriladi.

"X", "Y", "Z" zonalardagi g'altak guruhlarining chulg'amda teskari ulanishi shu zonalardagi g'altak EYK vektorlarining 180° ga burilganiga ekvivalent (teng kuchli)dir. Bunda 10.9, *a*-rasm o'rniga 10.9, *b*-rasmdagi g'altaklar EYK lari diagrammasiga ega bo'lamiz. Bu diagramma uchta sektordan tuzilgan bo'lib, q = 2 yoy va fazadagi g'altaklar soniga mos holda $2p{\cdot}q = 2{\cdot}2{\cdot}2 = 8$ vektordan iborat. Har bir fazadagi EYK lar mos sektordagi g'altaklar EYK lari vektorlarining yig'indisiga teng. Demak, hamma fazadagi EYK lar bir-biriga teng va faza bo'yicha 120° ga siljigan bo'ladi.

10.8-rasmda "A", "B" va "C" fazalarning bosh uchlari o'rnida bir-biriga nisbatan 120° ga siljigan 1, 5 va 9 g'altaklarning bosh uchlari olingan. "X", "Y" va "Z" fazalarning oxirgi uchlari o'rnida 19, 23 va 3 g'altaklarning boshlanishi mos keladi.



10.10.-rasm. *10.8-rasmda tasvirlangan chulg'am «A» fazasining parallel shoxobchalari soni a = 2 (**a**) va a = 4 (**b**) bo'lgandagi ulanish sxemalari.*

Faza zonasi α = 60° bo'lgan ikki qatlamli chulg'amning har bitta fazasidagi g'altaklar guruhlarining soni qutblar soni 2r ga teng. Har bitta qutbga va fazaga to'g'ri kelgan pazlar soni *q* butun son bo'lsa *a* = 2p gacha bo'lgan bir xil qiymatli va fazalari mos bo'lgan EYK lar hosil bo'ladigan parallel shoxobchalar (*a*) ni bajarish mumkin. Masalan, ko'rilayotgan (2p=4) chulg'amda *a* = 1; 2 yoki 4 ta parallel shoxobcha bajarish mumkin (10.10-rasm).

Uch fazali ikki qatlamli to'lqinsimon chulg'amlar. Katta quvvatli ko'p qutbli o'zgaruvchan tok mashinalarida, xususan, gidrogeneratorlarda magnit oqimning kattaligi va g'altaklar sonining ko'pligi tufayli stator chulg'amining zaruriy kuchlanishi g'altakdagi o'ramlar soni $w_{g'} = 1$ bo'lganda erishiladi. Bu holda ikki qatlamli chulg'am har qaysi pazda faqat ikki o'tkazgich yoki katta kesimli sterjenlarning pazdan tashqari qismlarini maxsus payvandlash yo'li bilan hosil qilinadigan o'ramlardan iborat bo'ladi. Bunday chulg'amni *sterjenli chulg'am* deyiladi.

Sterjenli to'lqinsimon chulg'amlar asosan katta quvvatli gidrogeneratorlarning stator chulg'ami uchun hamda o'rta va katta quvvatli faza rotorli asinxron motorlarning rotor chulg'ami uchun qo'llaniladi, chunki bu holda g'altak guruhlarini o'zaro ulashlarning kamayishi hisobiga misni tejashga va chulg'amni tayyorlash uchun mehnat sarfining

kamayishiga erishiladi. Bu iqtisod ayniqsa ko'p qutbli o'zgaruvchan tok mashinalarida, masalan, gidrogeneratorlarda anchagina bo'ladi.

10.2- m i s o l. Quyidagi berilganlar bo'yicha to'lqinsimon chulg'amni o'rganish talab etiladi: $Z = 24$, $m = 3$, $2p = 4$, $q = 2$, $y_1 = 5$, $y_2 = 7$, $\beta = 5 / 6$.

O'zgaruvchan tok to'lqinsimon chulg'amda pazlar soniga teng bo'lgan g'altaklarning umumiy soni uchga bo'linishi talab qilinadi. Bunday chulg'amni hosil qilish uchun

$$y_{nat} = Z / p = 6 q \qquad (10.6)$$

natijaviy qadam qo'llaniladi.

Chulg'am to'lqinining har xil qutblar ostidan ketma-ket o'tishida magnit maydonda siljish bo'lmaydi, lekin to'lqin boshlang'ich o'tkazgichga aylanib (qaytib) kelganda, natijaviy qadam unga nisbatan bitta sterjenga (orqaga yoki oldinga) sun'iy siljish qilinadi va bundan keyin u_{nat} qadam bilan yangi o'tish boshlanadi.

Uch fazali ikki qatlamli sterjenli to'lqinsimon chulg'am sxemasi (10.8-rasmdagi sirtmoqsimon chulg'amga oid berilganlar bo'yicha) 10.11-rasmda tasvirlangan. Faza zonalari bo'yicha pazlarning taqsimlanishi va g'altak tomonlari (o'tkazgichlari) EYK lari yulduzi ikki qatlamli sirtmoqsimonniki bilan bir xil bo'ladi. Sxemani ko'rib chiqish o'ng'ay bo'lishi uchun chulg'am sxemasining chizmasi 10.8-rasmdagiga nisbatan boshqa joydan qirqilgan holda tasvirlangan. 10.11-rasmdagi sxemada "A" fazaning boshlanishi № 2 o'ramdan, ya'ni 2-pazning ustki qatlamidan boshlangan. Bu o'ramni hosil qilish uchun pazlar sonida hisoblanadigan to'la qadam $y_r = \tau = Z/ (2p) = 24/ 4 = 6$ dan bittaga qisqartirilgan ($\beta = y/\tau = 5/6 = 0,833$; $y_1 = y\tau_1 \cdot \beta = 6 \cdot 0,833 = 5$), ya'ni $2 + y_1 = 2 + 5$ qadamdagi № 2 o'ramning oxiri (7-pazning pastki qatlami)dan to'la qadamga nisbatan bittaga uzaytirilgan $u_2 = 7$ qadam bilan № 14 o'ramga o'tiladi va bu o'ramning oxiri (19-pazning pastki qatlami)da yakor (stator) to'la ("p" ta, ya'ni juft qutblar soniga teng bo'lgan $p = 2$ o'ram aylanib chiqiladi.

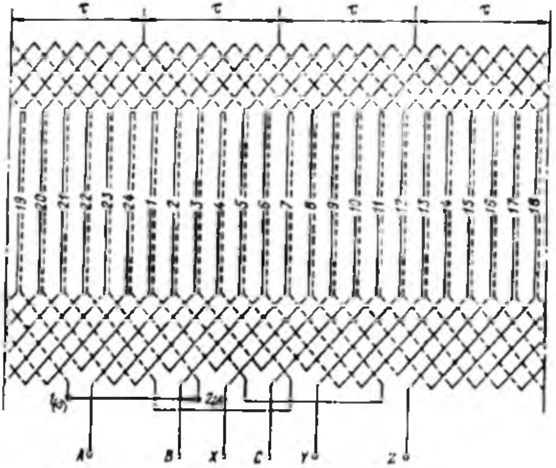
Yakorni ikkinchi o'tishda № 14 o'ramning oxirini № 1 o'ram boshiga ulash bilan boshlanadi. Bu ulanish boshqa ulanishlarga (masalan, №2 va № 14 g'altaklar orasidagi ulanish 7 ta tish bo'linmasiga teng) nisbatan qisqa. Yakorni ikkinchi aylanishda yana $p = 2$ ta (№ 1 va №13) g'altak o'tiladi va bu aylanishni 18-pazning pastki tomoni (10.11-rasmda $I_{(o)}$)dan chiqish bilan tugaydi (bunda indeks "(o)" – oxiri degan ma'noni beradi). Berilgan misolda $q = 2$ bo'lgani uchun shu bilan yakor atrofini aylanib

o'tishning birinchi sikli tugaydi. Bitta qutbga va har bitta fazaga to'g'ri keladigan pazlar soni $q = 3$, 4 va undan ko'p bo'lganda bu sikl 3, 4 va boshqa o'tishlar (aylanib chiqishlar)ni o'z ichiga olib, bunga chulg'amning "*pq*" o'ram (ya'ni g'altak)lari kiradi (berilgan misolda 2×2=4 o'ram), ya'ni fazaning barcha $2rq$ g'altaklarining yarmi kiradi.

10.11-rasmda "A" fazani aylanib o'tishning ikkinchi sikli ($2_{(b)}$ ning oxiri) № 19 g'altakning pastki tomoni (ya'ni № 24 pazning pastki tomoni)dan boshlangan, bunda (berilgan holda) fazaning barcha o'ramlari $1_{(o)}2_{(b)}$ ulagich orqali ketma-ket ulangan. Aylanib o'tishning ikkinchi sikli teskari yo'nalishda amalga oshiriladi, shu bilan birga $q = 2$ aylanib o'tishda 20, 8, 19, 7 pazlardagi g'altaklarni qamrab oladi va fazaning oxiri "X" bilan tugaydi. "B" va "C" fazalardagi ulanishlar ham shunga o'xshash bajariladi. O'zgaruvchan tok mashinasining qutblar sonidan qat'iy nazar chulg'am har qaysi fazadagi aylanib o'tishlar sikllarini ulaydigan uchta ulagichdan iborat bo'ladi.

Shunday qilib, to'lqinsimon chulg'amning har bitta fazasi har qaysida "*pq*" g'altak bo'lgan ikkita qismdan tashkil topgan. Bu qismlarni parallel ulasa ham bo'ladi. Bu holda to'lqinsimon chulg'am o'ng'ay bajariladigan $a = 2$ parallel shoxobchalarga ega bo'lishi mumkin.

Ta'kidlash lozimki, qisqartirilgan qadamli to'lqinsimon chulg'amlar sirtmoqsimon chulg'amlardagi singari mashinaning elektromagnit xossalarini yaxshilaydi, lekin chulg'amning birinchi qisman qadami y_1 bittaga qisqartirilib, ikkinchi qisman qadami y_2 esa bittaga uzaytirilgani



10.11-rasm. *Uch fazali ikki qatlamli to'lqinsimon chulg'am sxemasi ($Z = 24$, $m = 3$, $2p = 4$, $q = 2$, $y_1 = 5$, $y_2 = 7$, $\beta = 5/6$;*
«b» — boshi, «o» — oxiri.

tufayli chulg'amning pazlardan tashqari qismining umumiy uzunligi o'zgarmaydi va, demak, mis tejalmaydi.

Ikki qatlamli sterjenli to'lqinsimon chulg'amlar o'rta va katta quvvatli faza rotorli asinxron motorlarning rotor chulg'amini bajarishda ham keng qo'llaniladi. Bu holda chulg'am to'la qadam ($y = \tau$) bilan bajarilib, uning A, B, C boshlari va X, Y, Z oxirlari, rotor massasini muvozanatlash maqsadida, aylana bo'yicha bir tekis taqsimlanadi.

10.3. O'zgaruvchan tok mashinalari chulg'amlaridagi elektr yurituvchi kuchlar

Sinxron va asinxron mashinalarda aylanma magnit maydon hosil qilish usullari har xil bo'lsa ham (masalan, *sinxron generatorda* rotor bilan birga aylanadigan qo'zg'atish chulg'amiga o'zgarmas tok berib aylanma magnit maydon hosil qilinsa, *uch fazali asinxron motorda* esa bunday maydon stator chulg'amidan uch fazali tok o'tganda hosil bo'ladi), stator chulg'amida *elektromagnit induksiya qonuniga* asosan aylanma magnit maydon tufayli EYK larning hosil bo'lish jarayoni bir xil kechadi.

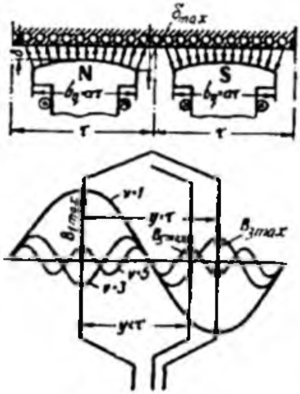
Sinxron generatorlarning stator chulg'ami o'tkazgichlariga (o'ramlariga ham) nisbatan har xil qutbiylikdagi (ishoradagi) qutblar navbatma-navbat o'tishi tufayli hosil bo'ladigan EYK o'z yo'nalishini o'zgartirib turadi, ya'ni o'zgaruvchan bo'ladi. Magnit maydon bir marta aylanganida o'tkazgichdagi EYK ning davri "*p*" ga, "*n*" ta aylanganida esa "*pn*" ga teng bo'ladi; demak, uning chastotasi: $f_1 = pn / 60$.

Mashina havo oralig'ining "*x*" nuqtasidagi o'tkazgich EYK ning oniy qiymatini aniqlash formulasi umumiy hol uchun quyidagicha yoziladi:

$$e'_{o'tk.x} = B_{\delta x} l_\delta v. \qquad (10.7)$$

Bundan, rotorning burchak tezligi *v* ni o'zgarmas qilinganda va stator chulg'ami o'tkazgichining aktiv (magnit maydon ta'siridagi) uzunligi l_δ = const bo'lganligi tufayli, EYK magnit maydonga mutanosib ravishda o'zgarib, uning vaqt bo'yicha o'zgarish shakli mashina havo oralig'idagi magnit induksiya Vδ ning qo'sh qutb bo'linmasi (2τ)dagi taqsimlanishini takrorlaydi.

Umumiy holda induksiyaning taqsimlanish shakli nosinusoidal xarakterda bo'ladi. Induksiyaning egri chizig'i absissalar o'qiga va qutblar o'qiga nisbatan simmetrik bo'lganligi tufayli, bu egri chiziqni Fure qatoriga yoyganda, unda faqat toq garmonikalar bo'ladi (10.12-rasm). Ularni



10.12-rasm. *Ayon qutbli sinxron generatorda qo'zg'alish hosil qilgan magnit maydon induksiyasi garmonikalarining mashina havo oralig'idagi stator yuzasi bo'lab taqsimlanishi;*
b_q — qutb uchligi kengligi.

oid qutblar sonining oshishi va mos ravishda qutblar bo'linmasining kamayishi ularning tartibiga bog'liq bo'ladi; *bu esa ularning o'ziga xos xususiyati fazoviy garmonikalar* deyiladi, chunki bu garmonikalar induksiyasining taqsimlanishi fazoviy koordinatalarga bog'liq bo'lib, vaqtga esa bog'liq emas. Bu garmonikalarga hisoblanadi.

Magnit maydon 1-garmonikasining o't-kazgichda hosil qilgan EYK ning 1-garmonikasi ($e_{o'tk1}$), uning amlitudasi ($E_{o'tk.max1}$) va ta'sir etuvchi ($E_{o'tk1}$) qiymatlari quyidagilarga teng bo'ladi.

$$e_{o'tk.1} = E_{o'tk.max1} \sin\omega t; \quad (10.8)$$

$$E_{o'tk.max1} = B_{\delta max1} \cdot l_{\delta} \cdot v; \quad (10.9)$$

$$E_{o'tk.1} = E_{o'tk.max1} / \sqrt{2} = (B_{\delta max1} / \sqrt{2}) \cdot l_{\delta} \cdot v, \quad (10.10)$$

bu yerda: $B_{\delta \cdot max1}$ — mashina havo oralig'idagi magnit maydon induksiyasining 1-garmonikasi, T; l_{δ} — o'tkazgichning aktiv magnit maydon ta'siridagi uzunligi, m; v — aylanma magnit maydonning burchak tezligi, m/s.

EYK ni hisoblashda qutb bo'linmasidagi magnit oqim Φ_{δ} dan foydalanish ma'qul hisoblanadi. Uning 1-garmonikasi quyidagiga teng:

$$\Phi_{\delta 1} = B_{\delta (o'rt).1} \cdot \tau \cdot l_{\delta}, \quad (10.11)$$

bu yerda: $B_{\delta (o'rt).1}$ — magnit induksiyaning o'rtacha qiymati;
$\tau = \pi D_1 / (2p)$ — qutb bo'linmasi; D_1 — statorning ichki diametri.

Sinusoida uchun $B_{\delta(o'rt).1} = (2/\pi) \cdot B_{\delta max1}$ bo'lganligi tufayli (10.11) formuladan quyidagiga ega bo'lamiz:

$$B_{\delta max1} = \Phi_{\delta 1} / (2\tau \cdot l_{\delta}). \quad (10.12)$$

$B_{\delta max1}$ ning bu qiymatini (10.10) ga qo'yib va

$$v = \pi p\ D_1 \cdot n_1 / 60 = \tau \cdot 2p \cdot n_1 / 60 = 2\tau \cdot f$$

tenglikni hisobga olgan holda quyidagiga ega bo'lamiz:

$$E_{o'tk\,1} = 2\ [\pi / (2\sqrt{2})] \cdot f\ \Phi_{\delta 1} = 2{,}22\ f\ \Phi_1. \qquad (10.13)$$

Magnit maydon shakli nosinusoidal bo'lganda o'tkazgichdagi EYK quyidagi formula bo'yicha hisoblanadi:

$$E_{o'tk} = 2\ k_V\ f\ \Phi_\delta; \qquad (10.14)$$

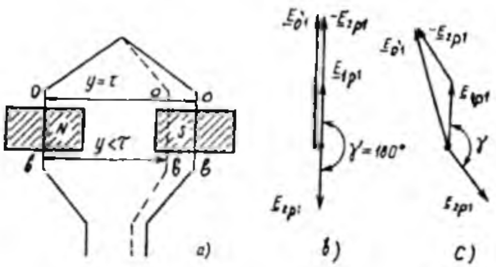
bu yerda: $k_B = B_{\delta max1} / B_{o'rt}$ – magnit maydon shaklining koeffitsienti. Magnit maydon sinusoidal shaklga ega bo'lganda $k_B = \pi / (2\sqrt{2}) = 1{,}11$ ga teng.

Taqsimlangan chulg'amda qo'shni pazlarda joylashgan o'tkazgichlar o'zaro fazoviy (geometrik) burchak ($\alpha\alpha = 360° / Z$) ga siljiganligidan, ularning EYK lari faza jihatdan mos tushmaydi. Qo'shni pazlardagi o'tkazgichlar EYK larining vektorlari bir-biridan o'zaro

$$\alpha_e = 360\ p\ /\ Z = \alpha\ p$$

elektr burchakka siljigan bo'ladi.

G'altak o'ramining EYK. Agar g'altak o'ramlari bir-biridan qutb bo'linmasiga teng ($y = \tau$) bo'lgan masofadagi pazlarda joylashgan o'tkazgichlardan yasalgan bo'lsa, ulardagi EYK lar o'zaro 180° ga siljigan bo'ladi, chunki o'ramning aktiv tomonlari (o'tkazgichlari) qarshi ulangan, ya'ni chap tomondagi o'tkazgichning oxiri o'ng tomondagi o'tkazgich oxiri bilan birlashtirilgan (10.13,*a*-rasm). Shu sababli o'ramning EYK ($E_{o'r\,1}$) o'tkazgichlardagi EYKlarning geometrik (vektor) ayirmasiga teng bo'ladi (10.13,*b*-rasm). Bu vektor diagrammadan ko'rinishicha, chulg'am qadami diametral ($y = \tau$) bo'lganda o'tkazgichlar EYK larining geometrik ayirmasi ($E_{o'r\,1(d)}$ – o'ram EYK) ularning arifmetik yig'indisiga teng bo'ladi, ya'ni



10.13-rasm. *Bitta o'ramning EYK ni aniqlashga oid chizma (a) (bunda: "b" – boshi, "o" – oxiri) chulg'am qadami diametral (y=τ) (b) va qisqartirilgan (y<τ) (c) bo'lgandagi EYK larning vektor diagrammalari*

$$E_{o'r.1(d)} = 2\,E_{o'tk.1} = 4{,}44\,f\,\Phi_{\delta 1}. \quad (10.15)$$

Chulg'am qadami qisqartirilgan ($y < \tau$) bo'lganda o'tkazgichlar EYK larining geometrik ayirmasi ($E_{o'r.1(qis)}$ – o'ram EYK), chulg'am qadami diametral bo'lgandagi ularning arifmetik yig'indisidan kichik ($E_{o'r.1(qis)} < E_{o'r.1(d)}$) bo'ladi:

$$E_{o'r.1(qis)} = 2\,E_{o'tk.1}\cdot \sin(\beta\pi/2) = 4{,}44\,f\,\Phi_{\delta 1}\,k_{qis.1}, \quad (10.16)$$

bu yerda $k_{qis.1} = \sin(\beta\pi\,/\,2)$ (10.17)

– *chulg'am qisqartirish koeffitsientining* 1-garmonikasi;

$\beta = (y\,/\,\tau)$ – chulg'amning nisbiy qadami.

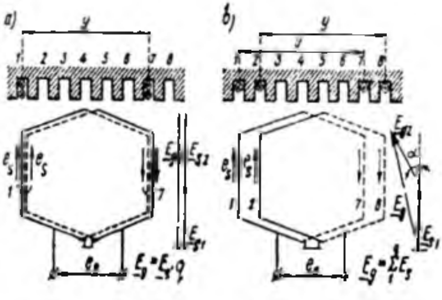
Qisqartirish koeffitsienti ν-garmonika uchun quyidagicha yoziladi:

$$k_{qis.\nu} = \sin(\nu\beta\pi\,/\,2). \quad (10.18)$$

O'ramlar soni w_s bo'lgan stator chulg'ami seksiyasi (g'altagi)da hosil bo'ladigan EYK ning qiymati quyidagiga teng bo'ladi:

$$E_{s.1(qis)} = w_s\cdot E_{o'r.1(qis)} = 4{,}44\,f\,\Phi_{\delta 1}\,w_s\cdot k_{qis.1}. \quad (10.19)$$

G'altaklar guruhining EYK. Agar g'altaklar guruhidagi barcha seksiyalar bir-biridan chulg'am qadami $y = \tau$ masofada joylashgan ikkita pazga to'plansa, u holda EYK lar faza jihatdan mos tushar, barcha seksiyalar guruhining EYK esa, shu guruhni hosil qiluvchi seksiyalar EYK larining arifmetik yig'indisiga teng bo'lar edi (10.13,*a*-rasm. Lekin, amalda statorlarning taqsimlangan holdagi, ya'ni g'altaklar guruhi qo'shni pazlarda joylashgan q ta bir xil g'altak (seksiya)laridan (10.14,*a*-rasm) tashkil topgan chulg'ami ishlatiladi. Ularda har qaysi g'altaklar guruhidagi seksiyalarning aktiv tomonlari har bitta qutb ostidagi $q > 1$ pazni egallaydi. Shuning uchun g'altaklar guruhining seksiyalarida hosil bo'ladigan EYK lar faza jihatdan bir-biriga nisbatan qo'shni pazlar orasidagi α_e burchakka siljigan bo'ladi (10.14,*b*-rasm).



10.14-rasm. *Chulg'am seksiyalari (q = 2) to'plangan (**a**) va pazlarda taqsimlangan (**b**) hol uchun seksiyalar guruhining EYK E_g va taqsimlanishi tushunchasiga oid chizmalar*

Seksiyalar guruhining hamma seksiyalari o'zaro ketma-ket ulanganligi sababli seksiyalar guruhining EYK lari yig'indisi E_{g1} alohida seksiyalar EYK larining geometrik yig'indisi ($E_{g1} = \sum_{1}^{q} E_{s1(qis)}$) ga teng bo'ladi (10.14,*b*-rasm). Bu yig'indi chulg'am diametral qadamli bo'lgandagi ularning arifmetik yig'indisi ($E_{g1(d)} = q\, E_{s1(d)}$)dan kichik bo'ladi. Bu EYK larning nisbati:

$$k_{t1} = E_{g1} / E_{g1(d)} = \sin(q\alpha_c /2) / [q \sin(\alpha_c / 2)]\ , \qquad (10.20)$$

– *chulg'am taqsimlanish koeffitsientining* 1-garmonikasi deyiladi.

Taqsimlanish koeffitsienti ν-garmonika uchun quyidagicha yoziladi:

$$k_{t\nu n} = \sin(q\nu\alpha_c /2) / [q \sin(\nu\alpha_c / 2)]\ . \qquad (10.21)$$

Seksiyalar guruhining EYK E_{g1} quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$E_{g1} = q\, E_{s1}\, k_{t1} = 4{,}44\, f\, \Phi_1 w_s \cdot q\, k_{qis1}\, k_{t1}. \qquad (10.22)$$

Chulg'am fazasining EYK. Hozirgi zamonda o'zgaruvchan tok mashinasi stator chulg'ami uchun ikki qatlamli qisqartirilgan qadamli taqsimlangan chulg'am turi keng qo'llanilmoqda. Avval ta'kidlab o'tilganidek, faza chulg'ami seksiyalar guruhlaridan tarkib topgan; bu guruhlar ham, o'z navbatida, bitta qutblar jufti ostida joylashgan "*q*" ta seksiyadan iborat. Demak, barcha guruhlar bir xil magnit sharoitlarda bo'lgan bir xil sondagi seksiyalardan tashkil topadi.

Bunday elektr mashinaning faza chulg'amida hosil bo'ladigan EYK shu fazaning tarkibidagi barcha g'altaklar (seksiyalar) EYK larining yig'indisiga teng bo'ladi. Fazaning ikki qatlamli chulg'ami 2*r* ta g'altaklar guruhidan, bir qatlamlisi esa *r* ta guruhdan iborat bo'ladi. G'altaklar guruhlari o'zaro ketma-ket, parallel yoki aralash (ketma-ket va parallel birgalikda) ulanishi mumkin (10.10-rasm). Agar seksiya (g'altak) guruhlari, o'ramlar soni w_s bo'lgan *q* ta seksiyadan iborat bo'lib, ular ketma-ket ulanganda chulg'amning har bitta shoxobchasi (*a*) va fazasida hosil bo'ladigan EYK ta'sir etuvchi qiymatining 1-garmonikasi quyidagiga teng bo'ladi:

$$E_1 = 4{,}44\, f\, w_1 \cdot k_{qis1} \cdot k_{t1} \cdot \Phi_1 = 4{,}44\, f\, w_1 \cdot k_{ch1} \cdot \Phi_1, \qquad (10.23)$$

bunda $k_{ch1} = k_{qis1} \cdot k_{t1}$ (10.24)

– o'rta va katta quvvatli mashinalar chulg'am koeffitsientining 1-garmonikasi.

10.4. O'zgaruvchan tok chulg'amlarining magnit yurituvchi kuchlari

O'zgaruvchan tok mashinasi havo oralig'idagi induksiya stator aylanasi bo'ylab magnit yurituvchi kuchning taqsimlanishi bilan aniqlanadi. Mashinaning statorida yoki rotorida joylashgan barcha o'zgaruvchan tok chulg'amlarining natijaviy magnit yurituvchi kuchi (MYK) havo oralig'ida aylanma magnit maydonini hosil qilishi lozim. Shuning uchun sinusoidal kuchlanish berilayotgan har bir chulg'am, fazoda sinusoidal taqsimlangan MYK ga ega bo'lishi kerak. Agar bu shartlar bajarilmasa (berilayotgan kuchlanish nosinusosoidal yoki MYK nosinusoidal taqsimlangan bo'lsa), u holda magnit maydoni tarkibida yuqori garmonikalar bo'lib, ular mashinaning energetik ko'rsatkichlarini yomonlashtiradi.

O'zgaruvchan tok mashinasi stator chulg'amlari MYK larini tahlil qilishda quyidagilar asos qilib olinadi:

1) o'zgaruvchan tok chulg'ami MYK vaqt bo'yicha o'zgaradi va bu bilan birga fazoda (stator aylanasi bo'ylab) taqsimlangan, deb faraz qilinadi;

2) stator chulg'amidagi tokning vaqt bo'yicha o'zgarishi sinusoidal shaklda, demak, chulg'am MYK ham sinusoidal shaklda o'zgaradi;

3) mashina havo oralig'i stator perimetri bo'yicha o'zgarmas, ya'ni rotor o'zagi silindrik shaklda, deb hisoblanadi;

4) rotor chulg'amida tok yo'q, demak, rotor magnit maydonni hosil qilmaydi, deb faraz qilinadi.

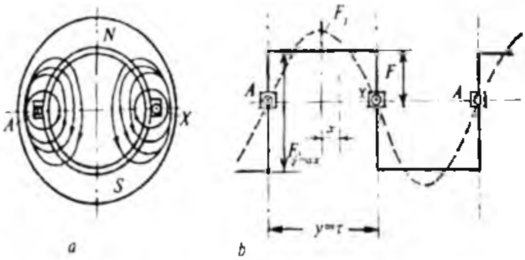
Yig'ilgan chulg'amning MYK. MYK ning taqsimlanishini yig'ilgan chulg'amli (10.15-rasm) ikki qutbli mashina misolida ko'rib chiqamiz.

Bunda AX faza chulg'amining hamma o'ramlari diametral yuzada joylashgan ikkita pazda joylashgan. Agar tok faza chulg'amining boshi A dan oxiri X ga yo'nalgan bo'lsa, kuch chiziqlari 10.15-rasmda ko'rsatilgandek yo'nalgan ikki qutbli magnit oqimi hosil bo'ladi. Bu oqimning har bitta kuch chizig'i faza g'altagining hamma o'ramlari ($w = w_{g'}$) bilan qurshaladi, shu sababli g'altak hosil qilgan MYK $F_{g'} = I \cdot w$ ga teng bo'ladi. Tok maksimal qiymatga ega bo'lganda MYK ham maksimal qiymatga erishadi.

$$F_{g'.max} = I_{max} \cdot w = \sqrt{2}\ I\ w, \qquad (10.25)$$

bunda I_{max}, I — tokning maksimal va effektiv ta'sir etuvchi qiymatlari.

Agar magnit zanjiri ferromagnit qismlarining magnit qarshiligini



10.15-rasm. *Ikki qutbli yig'ilgan chulg'amli mashinaning sxemasi (a) va yig'ilgan chulg'am MYKning taqsimlanish diagrammasi (b).*

nolga teng deb qabul qilinsa, u holda MYK ning taqsimlanishi stator aylanasi bo'ylab to'g'ri burchakli to'rtburchak shaklida bo'ladi (10.15,*b*-rasm).

Statorning yig'ilgan chulg'ami ikkita pazda joylashganligi tufayli, uning MYK ikkita (musbat va manfiy) to'g'riburchak ko'rinishida bo'ladi. Ulardan har birining qiymati magnit zanjirining bitta havo oralig'idan magnit oqimini o'tkazish uchun zarur bo'lgan MYK ga mos keladi, ya'ni:

$$F = F_{g\,max} / 2 = (\sqrt{2} \cdot I \cdot w) / 2 = (\sqrt{2} / 2) \cdot I \cdot w, \qquad (10.26)$$

To'g'ri burchakli to'rtburchak shakldagi MYK ni Fure qatoriga yoyib sinusoidalar yig'indisi ko'rinishida yozish mumkin:

$$F_x = (\sqrt{2} / 2) \cdot I \cdot w \cdot (4/ \pi) \cdot [\cos(\pi x/ \tau) + (1/ 3) \cdot \cos(3\pi x/ \tau) + (1/ 5) \cdot \cos(5\pi x/ \tau) + \ldots + (1/ n) \cdot \cos(n\pi x/ \tau)], \quad (10.27)$$

bu yerda: "x" – chulg'am simmetriya o'qi (faza o'qi)dan tekshirilayotgan nuqtagacha bo'lgan masofa; $(\sqrt{2} / 2) \cdot I \cdot w = F$ – mashina magnit zanjirida bitta havo oralig'idan magnit oqimini o'tkazish uchun zarur bo'lgan MYK.

Tok maksimal qiymatga ega bo'lganda, yig'ilgan chulg'am MYK ning birinchi garmonikasi quyidagiga teng bo'ladi:

$$F_1 = (2\sqrt{2} /\pi) \cdot I \cdot w = 0{,}9 \cdot I \cdot w. \qquad (10.28)$$

Demak, yig'ilgan chulg'amning MYK sinusoida shakldan ancha farq qilar ekan, shu sababli bunday chulg'amlar amalda kam ishlatiladi.

Taqsimlangan chulg'amning MYK. Magnit maydonning taqsimlanish egri chizig'ini sinusoidaga yaqinlashtirish maqsadida, har bir faza g'altaklari bir nechta pazlarga joylashtiriladi. Bunda chulg'amning sovitilishi ham yaxshilanadi.

10.16-rasmda 6 ta pazga (q = 3) joylashtirilgan ikki qutbli mashina

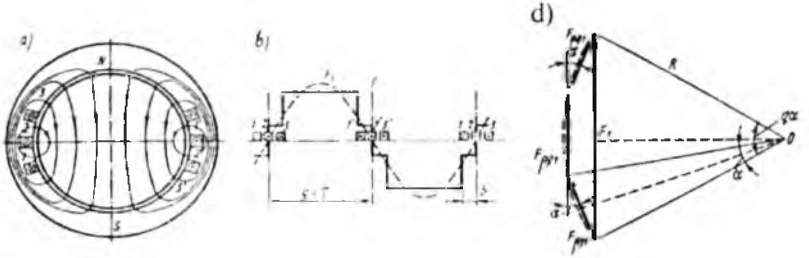
chulg'ami ko'rsatilgan. Bunday chulg'am MYK ning taqsimlanish shakli pog'onasimon bo'ladi. Taqsimlangan chulg'amning MYK o'ramlar soni $w = w'/3$ bo'lgan va fazoda $\alpha = \pi\beta/\tau$ burchakka (bunda β – qo'shni pazlar o'qlari orasidagi masofa) siljigan uchta yig'ilgan chulg'am MYK larining geometrik yig'indisidan iborat bo'ladi.

Taqsimlangan chulg'am MYK I-garmonikasi quyidagicha ifodalanadi:

$$F_{1I} = 0{,}9\, I\, w\, k_{t1},\qquad (10.29)$$

bunda $k_{t1} = \sin(q\alpha/2) / [q \sin(\alpha/2)]$ (10.30)

– *birinchi garmonika uchun chulg'amning taqsimlanish koeffitsienti* ($q = 3$).



10.16-rasm. *Ikki qutbli mashinaga oid ikki qatlamli taqsimlangan stator chulg'amining ko'ndalang qirqimi (**a**), chulg'am MYK ning taqsimlanish diagrammasi (**b**) va stator pazlarida taqsimlangan g'altaklar MYK larining I-garmonika vektorlarini qo'shish diagrammasi (**d**)*

Umumiy holda nn-garmonika uchun chulg'amning *taqsimlanish koeffitsienti* quyidagicha topiladi:

$$k_{t\nu} = \sin(q\nu\alpha/2) / [q \sin(\nu\alpha/2)],\qquad (10.31)$$

bunda $\nu\alpha$ – alohida g'altaklar MYK larining $\nu\alpha$-garmonika tashkil etuvchilari orasidagi siljish burchagi.

Chulg'am g'altaklarini pazlar bo'yicha taqsimlab joylashtirish, uning natijaviy MYK egri chizig'idagi yuqori garmonikalar amplitudalarini ancha kamaytiradi va mashina havo oralig'idagi maydon shaklini sinusoidaga yaqinlashtiradi.

Qadami qisqartirilgan chulg'amning MYK. Taqsimlangan chulg'amda MYK ning 5, 7-garmonikalarning ta'siri ancha kamayadi, lekin ayrim garmonikalar juda oz miqdorda kamayadi. Shuning uchun taqsimlangan chulg'amda chulg'am qadami qisqartiriladi ($y<\tau$). Bu holda chulg'am

ikki qatlamli qilib o'raladi, har bir seksiyaning bir tomoni pazning pastki qismida, ikkinchi tomoni esa boshqa pazning ustki qismida yotadi.

10.17-rasmda ikki qutbli mashinaning stator pazlarida $q = 3$ bo'lganda joylashtirilgan ikki qatlamli qadami qisqartirilgan chulg'am ko'rsatilgan. Berilgan holda har bitta faza chulg'ami oltita g'altakdan iborat. Birinchi, ikkinchi va uchinchi g'altak tomonlari 1, 2, 3 pazlarning pastki qatlamlarida va 2', 3', 4' pazlarning ustki qatlamlarida, to'rtinchi, beshinchi va oltinchi g'altak tomonlari esa – 2, 3, 4 pazlarning ustki qatlamlarida va 1', 2', 3' pazlarning pastki qatlamlarida yotadi. Bu chulg'am uchun MYK ning stator aylanasi bo'ylab taqsimlanishi 10.17-rasmda keltirilgan.

Qadami qisqartirilgan taqsimlangan chulg'amning MYK F_x ni hisoblashda o'ramlar soni $w' = w/2$, diametral qadamli, taqsimlangan, bir-biriga nisbatan $\pi(1-\beta)$ burchakka (bunda $\beta = y/\tau$ – *nisbiy qadam*) siljigan 2 ta chulg'am MYK (F'_{τ} va F'_x) larining geometrik yig'indisi orqali aniqlanadi. Bu chulg'amlardan bittasi 1–1', 2–2', 3–3' pazlarning pastki qatlamlarida joylashgan uchta g'altakdan, ikkinchi chulg'ami esa 2–2', 3–3' va 4–4' pazlarning ustki qatlamlarida joylashgan uchta g'altakdan iborat. Natijaviy MYK 1-garmonikasining amplitudasi ko'rsatilgan chulg'amlarning F'_1 va F'_1 MYK lari birinchi garmonika amplitudalarini vektor qo'shish yo'li bilan aniqlanadi. Faza tokining qiymati maksimal bo'lganda bu MYK lar $F'_1 = F'_1 = 0{,}45\, I\, w\, k_{t.1}$ bo'ladi.

Demak, pazlarda taqsimlangan qadami qisqartirilgan chulg'am MYK 1-garmonikasining qiymati quyidagicha topiladi:

$$F_1 = 2\,F'_1 \cos(\pi\beta/2) = 0{,}9 \cdot Iw \cdot k_{t1} \cdot k_{qis1}, \qquad (10.32)$$

bu yerda $k_{qis\,1} = \cos(\pi\beta/2)$ (10.33)

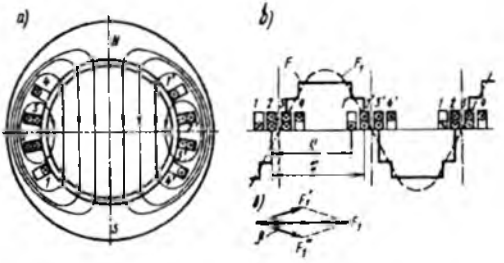
– birinchi garmonika uchun *chulg'amning qisqartirish koeffitsienti*.

Yuqori (ν) garmonika uchun qisqartirish koeffitsienti quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$k_{qis.\nu} = \cos(\nu\beta/2). \qquad (10.34)$$

Shunday qilib, chulg'am qadami qisqartirilganda MYK ning va induksiyaning taqsimlanishi sinusoidal shaklga yaqinlashar ekan.

Kam quvvatli mashinalarda pazlar qiyshiqligining MYK ga ta'sirini, ya'ni pazlarning qiyshiqligi tufayli mashina havo oralig'idagi magnit maydon tarkibidagi tish garmonikalari ta'sirini kamaytirishda chulg'am g'altaklaridagi EYK ga va chulg'amning MYK ga ta'sirini, pastda (10.5-bandda) ko'rsatilganidek, 1-garmonika uchun (10.46) va ν-garmonika uchun esa (10.47) lardagi *qiyshiqlik koeffitsientlari* orqali hisobga olinadi.



10.17-rasm. *Ikki qutbli mashinaga oid ikki qatlamli qisqartirilgan qadamli stator chulg'amining qirqimi (**a**) va mazkur chulg'am MYKning taqsimlanish diagrammasi(**b**).*

Qiyshiqlik koeffitsienti yuqori garmonikalarda birinchi garmonikasiga nisbatan ancha kichik bo'ladi. Pazlarning va ularda joylashgan g'altaklarning qiyshiqligi tufayli MYK ning tarqalish shakli sinusoidaga yaqinlashtiriladi.

10.1-jadvalda berilganlari: $q = 3$, $\alpha = 20°$, $y / \tau = 7/ 9$ bo'lgan chulg'am uchun k_1, k_{qis} va k_{ch} koeffitsientlarning qiymatlari keltirilgan.

10.1-jadval

Garmonika tartib raqami	1	3	5	7	9	11	13
k_q	0,96	0,667	0,217	0,177	0,333	0.177	0.217
k_{qis}	0,94	0,5	0,174	0,766	1,0	0.766	0.174
k_{ch}	0,902	0,333	0,038	0,135	0,333	0,135	0,038

Bu jadvaldan ko'rinishicha, chulg'am MYK yuqori garmonikalarining amplituda qiymatlari uning 1-garmonikaciga nisbatan ancha kam. Ularning 5, 7 va 9-garmonikalarining 1-garmonika MYK ga nisbati quyidagicha:

$F_3 / F_1 = (1/3)\ k_{ch.3}/ k_{ch.1} = 0,123$; $F_5 / F_1 = (1/5)\ k_{ch.5}/ k_{ch.1} = 0,\ 0084$;

$F_7 / F_1 = (1/7)\ k_{ch.7}/ k_{ch.1} = 0,025$; $F_9 / F_1 = (1/9)\ k_{ch.9}/ k_{ch.1} = 0,\ 041$.

E s l a t m a. Magnit zanjiri havo oralig'i va po'lat qismlarining magnit kuchlanishlarini muvozanatlash uchun zarur bo'lgan natijaviy MYK ni salt ishlash uchun hisoblash va mashinaning magnit xarakteristikasi kitobning 31.4-bandida keltirilgan.

10.5. O'zgaruvchan tok mashinasi havo oralig'idagi magnit maydon

Bir fazali chulg'amning magnit maydoni. Bir fazali chulg'am o'zgaruvchan tok manbayiga ulansa, vaqt bo'yicha tok chastotasi f_1 bilan o'zgaradigan *pulslanuvchi magnit maydon* hosil bo'ladi. Bu holda MYK sinusoidal taqsimlangan bo'lsa (10.18-rasm) – chulg'am o'qidan biror "x" masofada joylashgan havo oralig'ining har bir nuqtasiga quyidagi MYK to'g'ri keladi.

$$F_x = F_0 \cos(\pi x/\tau) = F_{max} \sin \omega t \cos(\pi x/\tau), \qquad (10.35)$$

bu yerda: $F_0 = F_{max} \sin \omega t$ – chulg'am o'qida joylashgan nuqtadagi MYK. (10.35) ifodani quyidagicha yozish mumkin

$$F_x = 0{,}5F_{max} \sin(\omega t - \pi x/\tau) + 0{,}5F_{max} \sin(\omega t + \pi x/\tau). \quad (10.36)$$

(10.36) tenglamaning o'ng tomonidagi har qaysi tashkil etuvchisi aylanuvchi MYK ning tenglamasini ifodalaydi. Demak, fazoda sinusoidal taqsimlangan pulslanuvchi magnit maydon, bir-biriga nisbatan teskari tomonga aylanuvchi ikkita (F'_x va F'_x) MYK yig'indisidan iborat ekan, ya'ni

$$F'_x = 0{,}5\ F_{max}\sin(\omega t - \pi x/\tau);\ F'_x = 0{,}5\ F_{max}\sin(\omega t + \pi x/\tau). \ (10.36)$$

MYK ning F'_x to'lqinining aylanish yo'nalishi soat mili (strelkasi) bo'yicha, F'_x to'lqinining aylanishi esa unga teskari deb qabul qilamiz.

MYK larining maksimal qiymatlari vaqtning istalgan paytida o'zgarmay qoladi. Agarda bu MYK lar yig'indisini fazoda vektor ko'rinishida tasavvur qilsak, u holda bu vektorning oxiri aylanani chizadi. Bunday maydonga *doiraviy maydon* deyiladi. Bu maydonning chiziqli tezligi quyidagicha topiladi:

$$v = dx / dt = \omega\tau / \pi = 2 f \tau. \qquad (10.37)$$

Maydonning aylanish chastotasi esa quyidagiga teng, (ayl/min):

$$n_1 = 60v / (\pi D) = 60 \cdot 2f\tau / (\pi D) = 60\ f / p, \qquad (10.38)$$

bu yerda $p = \pi D / (2\tau)$ – mashinaning juft qutblari soni.

Demak, mashinaning qutblar soni 2p ni o'zgartirib magnit maydonning har xil aylanish chastotani olish mumkin ekan.

Uch fazali chulg'amning aylanma magnit maydoni. Agarda elektr mashinasining statoriga simmetrik bo'lgan uch fazali chulg'am (o'qlari 120° ga siljigan A–X, B–Y va C–Z faza chulg'amlari) joylashtirilsa (10.19-rasm) va unga uch fazali simmetrik tok berilsa, u holda bu chulg'amda *doiraviy aylanma magnit maydon* hosil bo'ladi. Bunda har

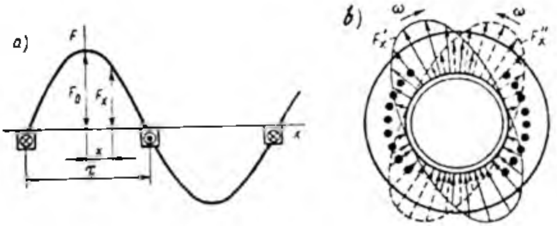
bir fazada hosil bo'lgan MYK sinusoidal taqsimlangan deb hisoblanadi.

Ko'rilayotgan chulg'am fazalarining o'qlari bir-biriga nisbatan fazoda $(2/3)\tau$ ga siljitilgan, ulardagi toklar esa vaqt bo'yicha $(2/3)\pi$ burchakka siljiganligidan har qaysi fazaviy chulg'am o'qidan "x" uzoqlikdagi nuqtada MYK tashkil etuvchilar uchun quyidagi ifodalarga ega bo'lamiz:

$$F_{xA} = F_{max}\sin\omega t\cdot\cos(\pi x/\tau) = 0{,}5F_{max}\cdot\sin(\omega t - \pi x/\tau) + $$
$$+ 0{,}5F_{max}\cdot\sin(\omega t + \pi x/\tau); \quad (10.39)$$

$$F_{xB} = F_{max}\sin(\omega t - 2\pi/3)\cdot\cos(\pi x/\tau - 2\pi/3) =$$
$$= 0{,}5F_{max}\sin(\omega t - \pi x/\tau) + 0{,}5F_{max}\sin(\omega t + \pi x/\tau - 4\pi/3); \quad (10.40)$$

$$F_{xC} = F_{max}\sin(\omega t - 4\pi/3)\cdot\cos(\pi x/\tau - 4\pi/3) =$$
$$= 0{,}5F_{max}\cdot\sin(\omega t - \pi x/\tau) + 0{,}5F_{max}\cdot\sin(\omega t + \pi x/\tau + 4\pi/3). \quad (10.41)$$



10.18-rasm. *Havo MYK ning taqsimlanish oralig'ida egri chizig'i (**a**) va pulslanuvchi maydonda o'zaro teng, to'g'ri va teskari aylanma MYK lar to'lqini(**b**).*

MYK ning natijaviy qiymatini uning F_{xA}, F_{xV}, F_{xS} tashkil etuvchilarini qo'shish yo'li bilan olish mumkin. Bunda MYK ning teskari aylanuvchi to'lqinlari yo'qoladi, MYK ning natijaviy qiymati esa quyidagi formula bo'yicha aniqlanadi:

$$F_{x(nat)} = 1{,}5\,F_{max}\sin(\omega t - \pi x/\tau). \quad (10.42)$$

Uch fazali mashinalar, odatda doiraviy aylanma maydonda ishlaydi.

Ikki fazali chulg'amning doiraviy aylanma magnit maydoni. Ikki fazali simmetrik chulg'amning AX va BY fazalari (10.20,*a*-rasm) fazoda bir-biriga nisbatan qutb bo'linmasi τ ning yarmiga siljigan bo'ladi. Agar bunday chulg'amning har bir fazasiga bir-biriga nisbatan vaqt bo'yicha $\beta = 90°$ burchakka siljigan ($I_B = \pm jI_A$) tok berilsa, (10.20,*b*-rasm), u holda doiraviy aylanma magnit maydon hosil bo'ladi.

Bu toklar hosil qilgan MYK tashkil etuvchilari mashina havo oralig'ida xohlagan "x" nuqta uchun quyidagi ko'rinishda yoziladi:

$$F_{xA} = F_{max\,A}\cdot\sin(\omega t)\cdot\cos(\pi x/\tau) = 0{,}5F_{max.A}\cdot\sin(\omega t -$$
$$- \pi x/\tau) + 0{,}5F_{max\,A}\cdot\sin(\omega t + \pi x/\tau); \quad (10.43)$$

$$F_{xV} = F_{max.V} \cdot \sin(\omega t - \pi/2) \cdot \cos(\pi x/\tau - \pi/2) =$$
$$= 0{,}5F_{max.V} \cdot \sin(\omega t - \pi x/\tau) + 0{,}5F_{max.V} \cdot \sin(\omega t + \pi x/\tau - \pi). \quad (10.44)$$

Bunda aylanma maydon tenglamasi quyidagi ko‘rinishga ega bo‘ladi:

$$F_{x.nat} = F_{xA} + F_{xB} = F_{max} \sin(\omega t - \pi x/\tau). \quad (10.45)$$

Bunday chulg‘amda hosil bo‘lgan doiraviy magnit maydonning aylanish chastotasi ham (10.38) tenglama bo‘yicha topiladi.

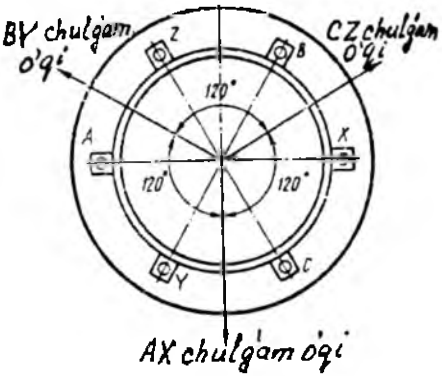
Ikki fazali mashinada doiraviy aylanma maydon olish uchun ikkita fazaning to‘g‘ri F'_{xA} va F'_{xB} yoki teskari F''_{xA} va F''_{xB} MYK lari bir-birini kompensatsiya qilishlari kerak, bu shart esa ko‘rsatilgan MYK lar amplitudalari teng, lekin fazalari qarama-qarshi, ya’ni $\alpha \pm \beta = \pi$ bo‘lishi kerak bo‘ladi.

Doiraviy aylanma magnit maydon quyidagi xossalarga ega:

a) natijaviy MYK va induksiyaning maksimumlari har doim toki maksimumga erishgan fazaviy chulg‘amning o‘qi bilan mos tushadi;

b) natijaviy magnit maydonning siljishi maydonning keyingi maksimumi qaysi qo‘shni fazaviy chulg‘am o‘qi bilan mos tushsa shu tomonga yo‘nalgan bo‘ladi. Bu xossa to‘g‘ridan to‘g‘ri oldingi (“a”) dan kelib chiqadi;

d) maydonning aylanish yo‘nalishini teskariga o‘zgartirish uchun fazalardagi tokning navbatlanish tartibini o‘zgartirish lozim. Uch fazali mashinalarda buning uchun tarmoqqa ulangan uchta simdan xohlagan ikkitasini almashlab ulash, ikki fazali mashinalarda tarmoq fazalariga ulangan simlarni almashtirish lozim bo‘ladi.



10.19-rasm. *Uch fazali ikki qutbli mashina statorida faza chulg‘amlarining joylashishi.*

Elliptik maydon. Fazoda bir-biriga nisbatan simmetrik joylashgan chulg‘amlardan vaqt bo‘yicha o‘zaro mos siljigan toklar o‘tganda aylanma magnit maydon hosil bo‘ladi. Agarda bu shartlardan birortasi bajarilmasa, aylanma magnit maydon emas, balki *elliptik maydon* hosil bo‘ladi. Bunday maydon MYK ning fazaviy vektori ellipsni chizadi.

Ellips shaklidagi aylanma magnit maydonda natijaviy MYK va induksiyaning maksimal qiymati vaqtning har xil onida o'zgaruvchan bo'ladi (doiraviy aylanma magnit maydonda esa bu qiymat o'zgarmas bo'ladi).

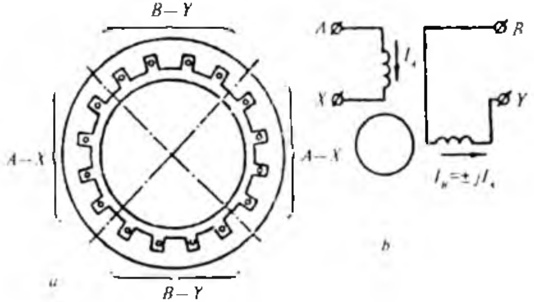
Ellips shaklidagi maydonni qarama-qarshi yo'nalishlarda aylanayotgan ikkita bir xil (ekvivalent) doiraviy maydon ko'rinishda tasavvur qilish mumkin. Natijaviy elliptik maydon yo'nalishida aylanayotgan maydonni – *to'g'ri maydon*, qarama-qarshi tomonga aylanayotganni esa *teskari maydon* deyiladi. Ellips shaklidagi maydonni to'g'ri va teskari doiraviy maydonlarga ajratish simmetrik tashkil etuvchilar metodi bilan amalga oshiriladi va bu orqali to'g'ri va teskari ketma-ketliklar MYK lari aniqlanadi.

10.6. O'zgaruvchan tok mashinalarida chulg'am EYK va MYK larining o'zgarish shaklini yaxshilash

Magnit maydon yuqori garmonikalarini kamaytirish usullari.

Sinxron generatorlarning stator chulg'amlarida hosil bo'ladigan EYK larga ularning vaqt bo'yicha o'zgarish shakli *sinusoidal bo'lishi* talab qilinadi, chunki aks holda generator elektr zanjirida tokning yuqori garmonikalari paydo bo'lib, ular generator va elektr iste'molchilari ishiga zararli ta'sir etadi, ya'ni energiya isroflari ko'payadi va generatorning o'zida ham, uzatish liniyalarida ham xavfli o'ta kuchlanishlar vujudga kelishiga yordam beradi. O'zgaruvchan tok motorlarida ham isroflar oshadi va, natijada, ularning foydali quvvati kamayadi hamda salbiy ta'sir ko'rsatadigan yuqori garmonika elektromagnit momentlari vujudga keladi.

EYK ning vaqt bo'yicha o'zgarish shakli ko'p jihatdan mashina qutb bo'linmasida havo oralig'i magnit maydonining taqsimlanish egri chizig'iga bog'liq bo'ladi. *EYK ning o'zgarish shaklini yaxshilash (sinusoidaga yaqinlashtirish) maqsadida* quyidagi usullardan foydalaniladi:



10.20-rasm. *Ikki fazali ikki qutbli mashinaning sxemasi va statorda faza chulg'amlarining joylashishi.*

1. *Uch fazali stator chulg'amini "yulduz" usulida ulash.* Bunda magnit maydonning uch va uch karrali yuqori toq (masalan, 3, 9, 15, ...) garmonikalari yo'qotiladi. Bu garmonikalar 1-garmonikadan farqli bo'lib, fazoda va vaqt bo'yicha siljishi bo'lmaydi, demak, uchala fazada ham yo'nalishi bir xil bo'lib, 3-garmonikaning natijaviy maydoni qo'zg'almas va pulslanuvchi bo'ladi, ya'ni *nul ketma-ketlikli maydon* xarakterida bo'ladi. Ular faza chulg'amlarida E_{A3}, E_{V3} va E_{S3} – EYK ning 3-garmonikalarini hosil qiladi. Bu EYK larning ham fazalari mos tushadi. Chulg'am EYK larining 3-garmonikalari liniyaga chiqmasligi "elektr tarmog'i – yulduz" konturi uchun *Kirxgofning ikkinchi qonuni* tenglamasidan kelib chiqadi.

Uch fazali stator chulg'amini "uchburchak" usulida ulaganda uchala fazada hosil bo'lgan EYK ning 3-garmonikalari o'zaro qo'shilib faqat uchburchak berk konturida aylanadigan tokning 3-garmonikasini vujudga keltiradi. Tokning bu garmonikasi ham liniya simiga chiqmasligi A, B va C tugunlari uchun *Kirxgofning birinchi qonuni* tenglamasidan kelib chiqadi. Lekin tokning 3-garmonikasi (i_3) tufayli qo'shimcha quvvat isroflari paydo bo'ladi va chulg'amning ortiqcha qizishiga olib keladi. Shu sababli sinxron generatorlarning stator chulg'amlarini "yulduz" usulida ulash maqsadga muvofiqdir.

2. *Chulg'am qadamini qisqartirish.* Diametral (to'la) qadamli ($y=\tau$) faza barcha yuqori garmonikalari mavjud bo'ladi. Chulg'am qadamini ma'lum chulg'amining har bitta o'ramida hosil bo'ladigan EYK ning tarkibida uning songa qisqartirish bilan EYK ning har bir aniq garmonikasini yo'qotishga erishish mumkin.

Chulg'am qadami $(1/5)\tau$ ga qisqartirilsa nisbiy qadam $\beta = 4/5 = 0{,}8$ bo'ladi. (10.18) ga binoan 5-garmonika ($v=5$) uchun $k_{qis.5} = \sin(5\cdot(4/5)\cdot\pi/2) = \sin(2\pi) = 0$ va shuning uchun EYK ning 5-garmonikasi ham $E_5 = 0$ bo'ladi. *Bunday natija quyidagicha tushuntiriladi.* Chulg'am qadami $(1/5)\cdot\tau$ ga qisqartirilganda ($y_1=(4/5)\tau = 0{,}8\cdot\tau$) g'altak tomonlarida faza bo'yicha mos tushadigan 5-garmonika EYK lar hosil bo'lsa ham, ular miqdor jihatdan teng ($e_{5(1)}=e_{5(2)}$) va o'ramning konturida qarama-qarshi yo'nalgan bo'lgani sababli g'altakda (demak, chulg'amda)gi 5-garmonika EYK ning natijaviy qiymati $E_5 = 0$ bo'lib (10.21,*d*-rasm), uning o'zgarish shakli sinusoidaga yaqinlashadi.

Shunga o'xshash, chulg'am EYK tarkibidan 7-garmonika EYK E_7 ni yo'qotish maqsadida chulg'am qadami $(1/7)\cdot\tau$ ga qisqartiriladi, ya'ni g'altak qadami $y_1 = (7/9)\cdot\tau = 0{,}857\cdot\tau$ qilib olinadi.

Bir vaqtning o'zida barcha garmonikalarni yo'qotishning iloji bo'lmaganligidan, odatda ta'siri kuchli bo'lgan 5 va 7-garmonikalarni keskin kamaytirish maqsadida *g'altakli chulg'amlar* uchun chulg'amning nisbiy qadamini $\beta = y/\tau = 0{,}8 \div 0{,}86$ oraliqda, *sterjenli chulg'amlar* uchun esa $\beta = 0{,}78 \div 0{,}833$ oraliqda olinadi. Bitta qutbiga va fazasiga to'g'ri kelgan pazlar soni $q > 5$ bo'lgan ikki qutbli mashinalarda texnologik sabablarga ko'ra chulg'am qadami, odatda $u \approx 0{,}66\,\tau$ qilib olinadi.

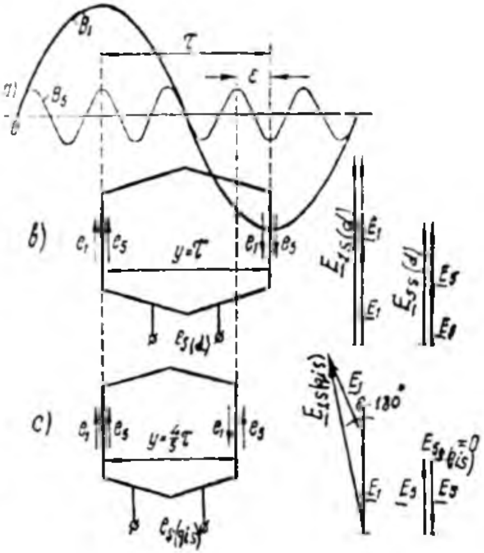
Shuni ta'kidlash lozimki, chulg'am qadami qisqartirilganda o'ramning EYK uning tomonlaridagi EYK larning geometrik yig'indisi orqali aniqlanganligi sababli EYK ning asosiy (birinchi) garmonikasi biroz kamayadi, masalan, $\beta = 5/6$ da $k_{qis\,1} = 0{,}966$, (bu nisbiy qadamdagi 5 va 7-garmonikalar uchun $k_{qis\,5} = 0{,}256$; $k_{qis\,7} = 0{,}256$).

Chulg'am qadamini qisqartirishni faqat ikki qatlamli chulg'amlarda amalga oshirish mumkin. Bir qatlamli chulg'amlar diametral qadamli qilib bajariladi. Shu sababli, ularda hosil bo'ladigan EYK lar tarkibida yuqori garmonikalar (shu jumladan,.eng kuchli ta'sir qiladiganlaridan 5 va 7-garmonikalar) bo'ladi. Bu kamchilik quvvati $P > 15 \div 22$ kW bo'lgan asinxron motorlarda bir qatlamli chulg'amlarni qo'llashni cheklab qo'yadi.

3. *Chulg'amni qutb bo'linmasida q ta g'altakni pazlar bo'yicha taqsimlab joylashtirish*. Bunga oid batafsil ma'lumot 10.2-bandda berilgan (10.14-rasm). *q qancha ko'p bo'lsa* (masalan, turbogeneratorlardagi singari), mashina magnit maydonining, demak, fazaviy chulg'ami natijaviy EYK ning ham o'zgarish shakli sinusoidaga yaqinlashadi. Lekin shuni nazarda tutish kerakki, q sonining ko'payishi natijasida izolatsiya hajmining nisbatan oshishi va chulg'amni bajarish ishlarining qimmatlashishi tufayli elektr mashinasining tannarxi oshadi. Odatda, $q = 2 \div 6$ oraliqda tanlanadi.

EYK ning tish garmonikalari va pazlarni qiyshiq qilib bajarish.

EYK ning vaqt bo'yicha o'zgarish shakliga stator va rotorda pazlar va tishlarning mavjudligi tufayli mashina havo oralig'idagi magnit oqim qutb bo'linmasi τ bo'ylab qayta taqsimlanadi, ya'ni rotor tishi stator tishining tagiga to'g'ri kelgan holatni egallaganda induksiya oshib, stator tishining tagiga paz yoki pazining tagiga rotor pazi joylashganda esa induksiya kamayadi. Natijada havo oralig'idagi induksiyaning taqsimlanishi arrasimon xarakterga ega bo'lib, magnit maydonida tish garmonikalari vujudga keladi (10.22,*a*-rasm). Bu garmonikalarning tartibi tishlar soniga bog'liq bo'ladi. Maydonning tish garmonikalari chulg'amlarda EYK lar va toklar hosil qilib, elektr mashinada qo'shimcha isroflarni oshiradi.



10.21-rasm. *Beshinchi garmonika EYK (E_5) ni chulg'am qadamini (1/5)τ ga qisqartirish, yo'qotish:*
a *— mashina havo oraligi magnit maydonining 1 va 5-garmonikalari ($B_{\delta 1}$; $B_{\delta 5}$);* ***b*** *havo-maydonning $B_{\delta 1}$ va $B_{\delta 5}$ garmonikalari diametral qadamli seksiya tomonlarida hosil qilgan $E_{g1.(d)}$ va $E_{g5.(d)}$ EYKlar;* ***d*** *— chulg'am qadami (1/5)τ ga qisqartirilganda $E_{g1.qis}$ va $E_{g5.qis}$ EYKlar.*

Chulg'am qadamini pazlar bo'yicha qisqartirish (y_1) tishlar soniga doimo karrali bo'lganligidan, u EYK ning tish garmonikalarini kamaytirishga imkoniyat tug'dirmaydi.

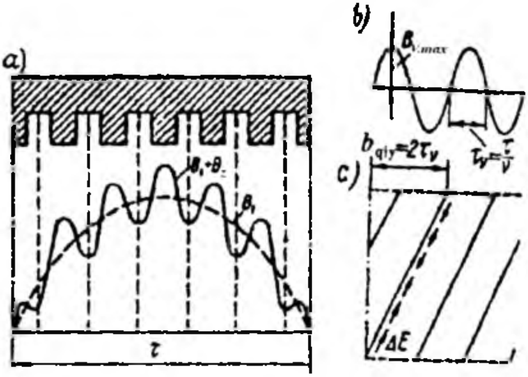
EYK o'zgarish shaklida tish garmoniklarini samarali kamaytirish uchun pazlarni yoki sinxron mashinalarda qutb uchligini bitta tish bo'linmasiga qiyshaytirib yasaladi. Bunda agar paz qiyshiqligi statorda bajarilsa, rotorning bitta tish bo'linmasiga teng qilib, rotorda bajarilganda esa statorning bitta tish bo'linmasiga teng qilib amalga oshiriladi.

Pazlarni qiyshiq qilganda EYK ning o'zgarish shaklidagi tish garmonikalarini to'la yo'qotish mumkin. Tish garmonikalarda tish va paz tagidagi magnit maydon qarama-qarshi qutbiylikka (ishoraga) ega bo'ladi, shu sababli qarama-qarshi magnit o'tkazgichning qiyshiq pazida joylashgan elektr o'tkazgichning ayrim qismlarida qiymat jihatdan bir xil va yo'nalishi jihatdan qarama-qarshi bo'lgan EYK lar hosil bo'lganligidan, ularning geometrik yig'indisi nolga teng bo'ladi.

Pazlarni qiyshiq qilganda EYK ning 1-garmonikasi nisbatan kamayadi va bu kamayishni qiyshiqlik koeffitsienti birinchi garmonikasi $k_{qiy.1}$ bilan hisobga olinadi:

$$k_{qiy.1} = \sin(\gamma/2) \;/\; (\gamma/2), \qquad (10.46)$$

bunda: $\gamma = (\nu b_{qiy}\pi)/\tau$ — paz oxirining uning boshiga nisbatan siljish burchagi;



10.22.-rasm. *Tish garmonikasi maydoni B_z tomonidan mashina havo oralig'ida magnit maydoni 1-garmonikasi Bd_1 ning buzilishi (**a**) va qiyshaytirib yasalgan pazning o'tkazgichida hosil bo'lgan to'la tish garmonikasi EYK to'la yo'qotilgan ($E_v = 0$) hol (**b**) va pazlarning qiyshiqligi (d).*

$b_{qiy} = 2p\tau / Z$ — tish bo'linmasi.

Yuqori garmonikalar uchun qiyshiqlik koeffitsientini aniqlash formulasi quyidagicha yoziladi:

$$k_{qiy.v} = \sin(v \cdot \gamma/2) / (v \cdot \gamma/2). \qquad (10.47)$$

Pazlarni qiyshaytirib yasalganda, ularda joylashgan o'ramlar uzunligining oshishi natijasida aktiv va tarqoq induktiv qarshiliklarining oshishiga olib keladi. Bu esa *ularning kamchiligi* hisoblanadi.

Chulg'am EYK ning yuqori garmonikalar tufayli kamayishini chulg'am koeffitsienti k_{ch} orqali hisobga olinadi; umumiy holda nn-garmonika uchun bu koeffitsient quyidagiga teng bo'ladi:

$$k_{ch.v} = k_{qis.v} \cdot k_{t.v} \cdot k_{qiy.v} \qquad (10.48)$$

Demak, faza chulg'ami EYK o'zgarish shakli yaxshilangan hol uchun 1-garmonikasini aniqlash formulasi quyidagicha yoziladi:

$$E_1 = 4{,}44\, f\, w_1\, k_{ch.1} \Phi_1, \qquad (10.49)$$

Shunday qilib, EYK ning vaqt bo'yicha o'zgarish shaklini sinusoidaga yaqinlashtirish uchun: chulg'am o'tkazgichlarini pazlar bo'yicha tarqatib joylashtirish, chulg'am qadamini qisqartirish va kam quvvatli mashinalarda stator yoki rotor pazlarini γ burchakka qiyshaytirib texnologik tayyorlash usullaridan foydalanilar ekan.

Nazorat savollari:

1) O'zgaruvchan tok chulg'amlarining turlariga oid ma'lumot bering.

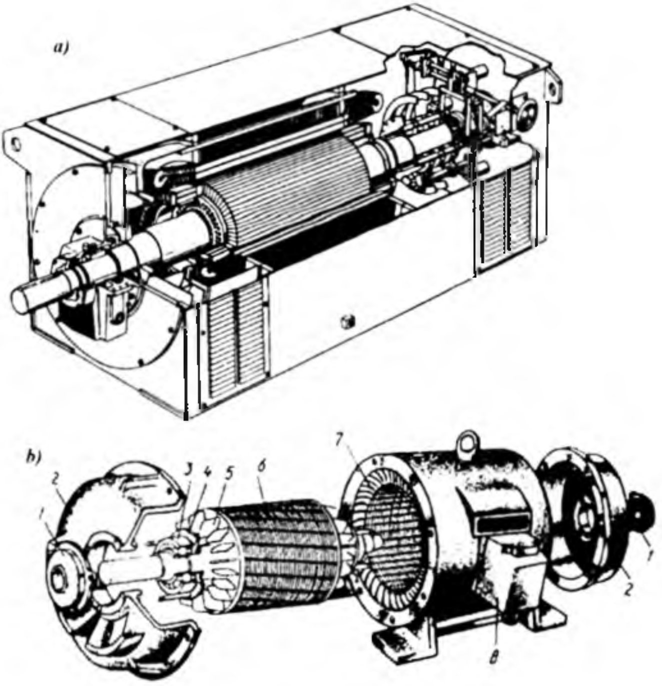
2) Chulg'am koeffitsientlariga nimalar kiradi?

3) MYK va EYK larning o'zgarish shakllari qanday usullar bilan yaxshilanadi?

III B O‘ L I M.

ASINXRON MASHINALAR

Kollektorsiz asinxron motorlar *zamonaviy elektr yuritmaning asosini* tashkil etib, sanoat turlarining barcha sohalaridagi avtomatik boshqarish jarayonlarida, qishloq xo‘jaligida, *kon ishlaridagi* yirik elektr jihozlari yuritmalarida va boshqa sohalarda keng qo‘llaniladi.



III.1-rasm. a) “BROWN BOVERI” (Shveysariya) *firmasi ishlab chiqargan katta quvvatli faza rotorli asinxron motor;* ***b) Rossiyada*** *ishlab chiqarilgan qisqa tutashgan rotorli asinxron motorning qismlarga ajralgan holda ko‘rinishi:* ***1*** *– qopqoq;* ***2*** *– podshipnik qalqoni;* ***3*** *– podshipnik;* ***4*** *– podshipnik qopqog‘i;* ***5*** *– ventilatsiya uchun kurakchalar;* ***6*** *– chulg‘ami qisqa tutashgan rotor;* ***7*** *– stator chulg‘ami;* ***8*** *– stator chulg‘ami chiqish uchlari jamlangan quticha.*

11-BOB. ASINXRON MASHINALARDA FIZIK JARAYONLAR

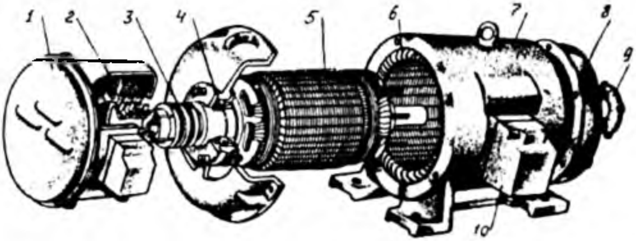
11.1. Asinxron mashinaning tuzilishi, ishlash prinsipi va ish rejimlari

Asinxron motorning rotori stator ichiga o‘rnatiladi. Rotor — val, po‘ lat o‘zak va uning pazlariga joylashtirilgan qisqa tutashgan chulg‘am yoki uchta fazaviy chulg‘amdan iborat. Stator — tana, po‘lat o‘zak va uning pazlarida joylashgan bir, ikki yoki uch fazali chulg‘amdan iborat. Stator va rotorlarning po‘lat o‘zaklari maxsus elektrotexnik po‘latdan tayyorlangan yupqa plastinalardan yig‘iladi.

Asinxron motorlar rotorining tuzilishiga qarab ikki xil bo‘ladi:

1) qisqa tutashgan rotorli asinxron motor (rotor chulg‘ami qisqa tutashgan) (11.1-rasm);

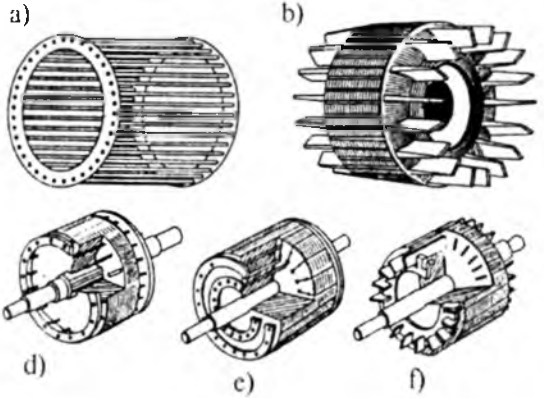
2) faza rotorli asinxron motor (rotor chulg`ami uch fazali) (11.1-rasm).



11.1-rasm. *Faza rotorli asinxron motorning qismlarga ajralgan holda ko‘rinishi:* ***1*** *— kontakt halqalari va cho‘tkalar joylashgan tomondagi qopqoq;* ***2*** *— cho‘tka tutqich va cho‘tkalar;* ***3*** *— kontakt halqalar;* ***4*** *— podshipnik;* ***5*** *— rotorning po‘lat o‘zagi (uning pazlarida uch fazali chulg‘am);* ***6*** *— stator chulg‘ami;* ***7*** *— korpus;* ***8*** *— podshipnik qalqoni;* ***9*** *— valning mexanizmga ulanadigan tomonidagi podshipnik qalqonining qopqog‘i;* ***10*** *— stator chulg‘ami chiqish uchlari jamlangan quticha.*

Qisqa tutashgan rotorli asinxron motor — rotorining po‘lat o‘zagi pazlariga eritilgan aluminiy quyilib chulg‘am o‘tkazgichlari (sterjenlar) hosil qilinadi va ularning pazlardan tashqari uchlari ikki tomondan quyma aluminiy halqalar orqali qisqa tutashgan bo‘ladi. Natijada, yaxlit «olmaxon katagi» ko‘rinishidagi qisqa tutashgan chulg‘am hosil qilinadi (11.2,*a*-rasm).

Faza rotorli asinxron motori ham val, valga o‘rnatilgan po‘lat o‘zak,



11.2-rasm. *Chulg'ami qisqa tutash-gan konstruksiyalari:* ***a*** *– «olmaxon katagi» sterjenlari;* ***b*** *– quyma aluminiy chulg'amli;* ***d*** *– odatdagi katakli;* ***e*** *– qo'sh katakli;* ***f*** *– chuqur katakli.*

uning pazlariga bir-biriga nisbatan 120° ga siljigan uch fazali chulg'am joylashtiriladi (11.1-rasm). Rotorning fazaviy chulg'amlari yulduz usulida ulangan bo'ladi va ularning uchlari esa valning bir tomonida o'rnatilgan uchta mis yoki jez (mis va rux aralashmasi) halqalarga ulanadi.

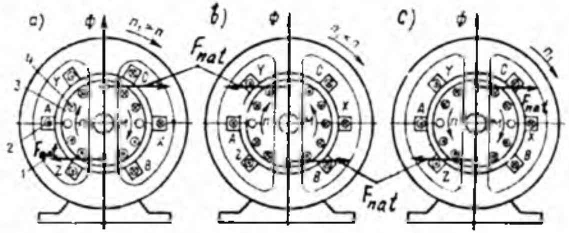
Ishlash prinsipi. Uch fazali asinxron motorning stator chulg'amiga uch fazali tok berilganda vujudga kelgan magnit yurituvchi kuch (MYK) statorda aylanish chastotasi $n_1 = 60\ f\ /p$ bo'lgan aylanma magnit maydonni hosil qiladi. Bu maydon kuch chiziqlari stator chulg'ami o'ramlarini va rotorning qisqa tutashgan chulg'am sterjenlarini yoki uch fazali chulg'ami o'ramlarini kesib o'tib, ularda EYK lar hosil qiladi. Agar rotor chulg'ami qisqa tutashgan bo'lsa, undagi EYK ta'sirida qisqa tutashgan rotor chulg'amlari o'tkazgichlaridan tok o'tib, bu tokning stator hosil qilgan aylanma magnit maydoni bilan o'zaro ta'siri natijasida rotor chulg'ami o'ramlariga elektromagnit kuch ta'sir qiladi. Bu kuch hosil qilgan aylantiruvchi (elektromagnit) moment tormozlovchi momentdan katta bo'lsa, rotorni aylanma magnit maydon yo'nalishida aylantiradi.

Aylanma magnit maydonning aylanish chastotasi n_1 bilan rotorning aylanish chastotasi n orasidagi nisbiy farqqa sirpanish (s) deyiladi va u quyidagicha aniqlanadi (*n.b.* – ***nisbiy birlik***):

$$a)\ s_{(n.b.)} = \left(n_1 - n\right)/\,n_1\ ;\ \ b)\ s_{(\%)} = \left(n_1 - n\right)/\,n_1 \cdot 100 \qquad (11.1)$$

Ish rejimlari. Stator magnit maydonining aylanish chastotasi n_1 va rotorining aylanish chastotasi n larning qiymatlariga bog'liq holda asinxron mashina motor, generator va elektromagnit tormoz rejimlarida ishlashi

mumkin. Bulardan tashqari qisqa tutashuv va salt ishlash rejimlari ham mavjuddir.



11.3-rasm. *Asinxron mashinaning motor (**a**), generator (**b**) vaelektomagnit tormoz (**d**) ish rejimlarida elektromagnit kuch va momentining yo'nalishi va elektromagnit*

Asinxron mashina *motor rejimida* (11.3,*a*-rasm) ishlaganida rotorning aylanish chastotasi stator aylanma magnit maydoni chastotasidan kichik ($n_1 > n$) bo'lib, sirpanish esa $0 < s < 1$ oraliqda bo'ladi. Bu holda stator chulg'ami tarmoqdan elektr energiya bilan ta'minlanadi va rotorning vali qandaydir mexanizmga mexanik momentni beradi. *Mashinada elektr energiya mexanik energiyaga aylantiriladi.*

Asinxron mashinaning rotori tormozlanib ($n = 0$), stator chulg'ami tarmoqqa ulangan holatni *qisqa tutashuv rejimi* deyiladi (bunda sirpanish $s = 1$ bo'ladi). Agar rotorning aylanish chastotasini stator chulg'ami aylanma magnit maydoni chastotasi (sinxron chastotasi) bilan teng ($n = n_1$) qilinsa (buning uchun birlamchi motor yordamida rotorning aylanish chastotasini biroz oshirish zarur), sirpanish $s = 0$ bo'ladi. Bunda aylantiruvchi moment hosil bo'lmaydi, chunki aylanma maydon rotor chulg'amini kesib o'tmaydi. Bunday rejimni asinxron mashinaning *ideal salt ishlash rejimi* deyiladi.

Agar asinxron mashinaning rotorini birorta mexanizm yordamida statormagnit maydoni aylanish chastotasidan katta ($n > n_1$) bo'lgan chastotada aylantirilsa rotor chulg'ami o'tkazgichlaridagi EYK, tokning aktiv tashkil etuvchisi va sirpanishlar o'z yo'nalishini o'zgartiradilar. Bunda elektromagnit moment M ham o'z yo'nalishini o'zgartirib *tormozlovchi* bo'ladi (11.3,*b*-rasm), ya'ni asinxronnaya mashina *generator rejimiga* o'tadi. Asinxron mashina generator rejimda birlamchi motordan mexanik energiya olib, uni elektr energiyaga aylantirib tarmoqqa beradi. Bunda sirpanish $0 > s > -\infty$ oraliqda o'zgaradi ("$-\infty$" – nazariy nuqtayi nazardan; amalda esa olib bo'lmaydi).

Agar asinxron mashinaning rotorini boshqa motor bilan stator magnet maydoni aylanishiga teskari yo'nalishda aylantirilsa, rotor

chulg'ami o'tkazgichlaridagi EYK va tokning aktiv tashkil etuvchisi motor rejimidagi singari yo'nalgan bo'ladi, ya'ni mashina tarmoqdan energiya oladi. Lekin bu rejimda elektromagnit moment rotor aylanishiga teskari yo'nalib, tormozlovchi bo'ladi (11.3,c-rasm). Bu rejim — asinxron mashinaning *elektromagnit tormoz rejimi* deyiladi. Bu rejimda rotorning aylanish yo'nalishi aylanma maydonnikiga nisbatan teskari bo'lgani uchun rotor aylanish chastotasi $n<0$, sirpanishi esa $1< s < +\infty$ oraliqda o'zgaradi. Bu rejimda asinxron mashina rotor tomonidan mexanik energiya, stator tomonidan esa elektr energiya oladi.

Asinxron mashinaning elektromagnit tormoz rejimi amaliyotda kranlarda va ko'targich mexanizmlarda yukni tushirish jarayonida uning tezligini kamaytirish yoki zarur bo'lganda ularni tezda to'xtatish uchun qo'llaniladi. Bu maqsadda stator chulg'amiga tarmoqdan ulangan xohlagan ikkita simning o'rnini almashtirib ulash kerak bo'ladi. Bu holda statorning aylanma magnit maydoni o'z yo'nalishini o'zgartiradi va tormoz momentini hosil qiladi. Bu rejimda sirpanish katta ($s = 1$) bo'lganligidan, rotor chulg'amidagi EYK, demak, tok ham katta bo'ladi. Bu tokni kamaytirish uchun faza rotorli motorda rotor chulg'amini aktiv qarshilikka — tormozlovchi reostatga ulaydilir.

Umumiy maqsadli asinxron motorlar nominal yuklama bilan ishlayotgandagi sirpanish $s_N = 3 \div 5$ % ni, maxsus asinxron motorlarning ayrimlarida esa $s_N = 12 \div 15$% ni tashkil qiladi.

11.2. Rotori tormozlangan asinxron mashinada elektromagnit jarayon va rotor chulg'ami parametrlarini stator chulg'amiga keltirish

Rotori tormozlangan faza rotorli asinxron mashinada elektromagnit jarayon. Rotori qo'zg'almas bo'lgan asinxron mashina xuddi transformator kabi ishlaydi. Rotori qo'zg'almas bo'lganda (bunda, $s = 1$) mashinaning stator va rotor chulg'amlarida bir xil ($f_2 = f_1$) chastotali EYK lar hosil bo'ladi va ular quyidagicha aniqlanadi:

$$E_1 = 4{,}44\, f_1 \cdot w_1 \cdot k_{ch\,1} \cdot \Phi_{max}\,; \qquad (11.2)$$

$$E_2 = 4{,}44\, f_1 \cdot w_2 \cdot k_{ch\,2} \cdot \Phi_{max}\,, \qquad (11.3)$$

bu yerda: $k_{ch\,1}$, $k_{ch\,2}$ — stator va rotorning chulg'am koeffitsientlari; w_1, w_2 — stator va rotor chulg'ami bitta fazasining o'ramlar soni; Φ_{max} — magnit oqimning maksimal qiymati.

(11.2) ning (11.3) ga nisbati:

$$E_1 / E_2 = w_1 \cdot k_{ch.1} / (w_2 \cdot k_{ch.2}) = k_E \quad (11.4)$$

– rotori ko'zg'almas asinxron mashinada *kuchlanishni transformatsiyalash koeffitsienti* deyiladi.

Agar faza rotorli asinxron mashinaning rotor chulg'ami ochiq bo'lsa undan tok o'tmaydi va bu holatni *salt ishlash rejimi* deyiladi. Bunday rejim statorda bo'ladigan elektromagnit jarayonga ta'sir qilmaydi.

Salt ishlayotgan asinxron mashina statorining fazaviy chulg'amlari uchun EYK lar muvozanat tenglamasi transformatordagi kabi quyidagicha yoziladi:

$$\underline{U}_1 + \underline{E}_1 + \underline{E}_{\sigma 1} = \underline{I}_0 \cdot r_1 , \quad (11.5)$$

bu yerda: $E_{\sigma 1} = 4{,}44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_{ch.1} \cdot \Phi_{\sigma 1}$ (11.6)

– tarqoq magnit oqimi $\Phi_{\sigma 1}$ stator chulg'amida hosil qilgan tarqoq EYK; $I_0 r_1$ – stator chulg'ami aktiv qarshiligida kuchlanish pasayishi.

(11.5) formula asosida va salt ishlashda stator chulg'amidagi tok $\underline{I}_0 = \underline{I}_{0.r} + \underline{I}_{0.a}$ ekanligini hisobga olgan holda, asinxron mashinaning vektor diagrammasini qurish mumkin. Bu diagramma salt ishlayotgan transformator diagrammasidan (3.2,*b*-rasm) vektorlar uchun tanlangan masshtab bilan farq qiladi, xolos. Bunga sabab, asinxron mashinada havo oralig'i mavjudligidan salt ishlash toki I_0 transformatornikidan miqdor jihatdan taxminan 10÷12 marta katta, ya'ni umumiy maqsadli asinxron motorlarda nominal toki I_N ning 20÷40% ni tashkil qiladi.

Asinxron mashinalarda salt ishlash toki I_0 ning katta bo'lishi ulardagi eng *asosiy kamchilik* bo'lib, u stator chulg'amidagi elektr isrofni oshiradi va mashinaning quvvat koeffitsienti cosφ ni kamaytiradi. Salt ishlash toki I_0 ni kamaytirish uchun asinxron mashinalardagi havo oralig'i zavod tomonidan iloji boricha (konstruktiv va texnologik nuqtayi nazardan) kichik qilib tayyorlanadi. Masalan, quvvati 5 kW gacha bo'lgan asinxron motorlarda stator va rotor orasidagi havo oralig'i 0,1÷0,3 mm ni tashkil qiladi.

Rotor chulg'ami parametrlarini stator chulg'amiga keltirish. Asinxron mashinalarda rotor va stator chulg'amlar o'ramlari soni har xil bo'lganligi tufayli ulardagi elektromagnit jarayonni o'rganishda qiyinchilik tug'iladi. Buni bartaraf etish maqsadida *hisobiy usuldan foydalaniladi*, ya'ni rotor chulg'amining o'ramlar soni stator chulg'ami o'ramlar soniga keltiriladi. Bu holda asinxron mashinaning tarmoqdan olayotgan aktiv va reaktiv quvvatlari, FIK va cosφ o'zgarmay qolishi kerak.

Stator va rotor chulg'amlarining tegishlicha F_1 va F_2 MYK lari to'lqinlarining aylanish chastotalari o'zaro teng bo'lgandagina asinxron

mashina ishlay oladi. Demak, stator va rotor bir xil juft qutblari soni ($p_1 = p_2 = p$)ga ega bo'lishi kerak. Bu shart bajarilganda rotor MYK to'lqini stator MYK to'lqiniga nisbatan qo'zg'almas bo'lib o'zaro ta'sirlashadilar. Natijada asinxron motorda statordan rotorga elektromagnit quvvat uzatiladi.

Asinxron motorning ishlash jarayonida stator va rotor chulg'amlaridagi toklar mashinada tegishlicha F_1 va F_2 MYK larni hosil qiladi. Bu MYK larning birgalikda ta'sir etishidan statorga nisbatan sinxron chastota n_1 bilan aylanadigan umumiy magnit oqim vujudga keladi. Uning qiymati quyidagiga teng:

$$\underline{\Phi} = (\underline{F}_1 + \underline{F}_2) / R_m = \underline{F}_0 / R_m, \qquad (11.7)$$

bunda R_m — motor magnit zanjirining oqim Φ ga ko'rsatadigan magnit qarshiligi; F_0 — miqdor jihatdan salt ishlashdagi stator chulg'ami MYK ga teng bo'lgan motorning natijaviy MYK:

$$F_0 = 0{,}45\ m_1\ I_0\ w_1\ k_{ch\,1} / p; \qquad (11.8)$$

I_0 — stator chulg'amida salt ishlash toki, A.

Valiga yuklama ulangan ish rejimida motorning bitta qutbiga to'g'ri keladigan stator va rotor chulg'amlarining MYK lari quyidagilarga teng bo'ladi:

$$F_1 = 0{,}45\ m_1\ I_1\ w_1\ k_{ch\,1} / p; \qquad (11.9)$$

$$F_2 = 0{,}45\ m_2\ I_2\ w_2\ k_{ch\,2} / p; \qquad (11.10)$$

bunda: m_2 — rotor chulg'amida fazalar soni; $k_{ch\,2}$ — rotor chulg'amining chulg'am koeffitsienti; p — mashina juft qutblari soni; w_2 — rotor chulg'ami o'ramlari soni.

Motor valiga qo'yilgan yuk o'zgarganda stator va rotor chulg'amlaridagi I_1 va I_2 toklar o'zgaradi, bu esa shu chulg'amlardagi MYK lar (F_1, F_2)ning tegishlicha o'zgarishiga olib keladi. Lekin bunda asosiy magnit oqim F o'zgarmay qoladi, chunki stator chulg'amiga berilgan kuchlanish U_1 = const va stator chulg'amining EYK E_1 bilan deyarli to'la muvozanatlashadi:

$$\underline{U}_1 \approx (-\underline{E}_1). \qquad (11.11)$$

EYK E_1 asosiy magnit oqim Φ ga mutanosib bo'lganligidan mazkur oqim, valdagi yukning o'zgarishidan qat'i nazar deyarli o'zgarmay (F ≈ const) qoladi. Shu sababli F_1 va F_2 larning o'zgarishiga qaramasdan, natijaviy MYK o'zgarmay qoladi, ya'ni $\underline{F}_0 = \underline{F}_1 + \underline{F}_2 = \text{const}$ bo'ladi.

Keltirilgan (hisobiy) chulg'am va haqiqiy chulg'am o'ramlar sonida mashinaning magnit oqimi Φ_{max} o'zgarmay qolishi kerak, ya'ni:

$$\Phi_{max} = E_2 / (4{,}44 \cdot w_2 \cdot k_{ch.2} \cdot f_1) =$$

$$= E'_2 / (4{,}44 \cdot w_1 \cdot k_{ch.1} \cdot f_1) = \text{const}. \qquad (11.12)$$

bunda rotor tormozlangan holatda ($s = 1$) uning chulg'amidagi EYK chastotasi $f_2 = f_1$ bo'lishligi hisobga olingan.

(11.12) shartdan rotor chulg'amining keltirilgan EYK E'_2 quyidagiga teng bo'ladi:

$$E'_2 = E_2 [w_1 k_{ch.1} / (w_2 k_{ch.2})] = k_E E_2 = E_1 , \qquad (11.13)$$

bu yerda: $k_E = (w_1 k_{ch.1}) / (w_2 k_{ch.2})$ (11.14)

— rotori tormozlangan asinxron mashina *EYK lari va kuchlanishlari uchun* keltirish koeffitsienti.

Transformatordagi singari keltirilgan va haqiqiy chulg'am MYK larining o'zgarmay qolishi $[(m_1 w_1 k_{ch.1}) I'_2 = (m_2 w_2 k_{ch.2}) I_2]$ shartidan rotor chulg'amining keltirilgan toki I'_2 ni aniqlaymiz:

$$I'_2 = [(m_2 w_2 k_{ch.2}) / (m_1 w_1 k_{ch.1})] \cdot I_2 = I_2 / k_I = I_1, \qquad (11.15)$$

bu yerda $k_I = (m_1 w_1 k_{ch.1}) / (m_2 w_2 k_{ch.2}) = (m_1/m_2) \cdot k_E$ (11.16)

— rotori tormozlangan asinxron mashina *toklari uchun keltirish koeffitsienti.*

Shunga e'tibor berish kerakki, asinxron mashinada $k_I \neq k_E$, chunki umumiy holda stator chulg'ami fazalari soni m_1 bilan rotor chulg'ami fazalari soni m_2 bir xil emas (faqat $m_1 = m_2$ bo'lgan faza rotorli asinxron motorlarda bu koeffitsientlar bir-biriga teng bo'ladi).

Rotor chulg'ami zanjiridagi quvvat isroflarining o'zgarmay qolishi $[(m_2 I_2^2 r_2) = m_1 (I'_2)^2 r'_2]$ shartidan keltirilgan aktiv qarshilik r'_2 ni hisoblashda (11.15) dan I'_2 ning qiymatini qo'yib topamiz, ya'ni:

$$r'_2 = (m_2 / m_1) \cdot (I_2 / I'_2)^2 \cdot r_2 = k_E k_I \cdot r_2 = k_z \cdot r_2. \qquad (11.17)$$

Rotorning haqiqiy va keltirilgan chulg'amlaridagi nisbiy induktiv kuchlanish pasayishlarining tengligi (ya'ni *reaktiv quvvatning o'zgarmay qolishi*) $[I_2 x_2 / E_2 = I'_2 x'_2 / E'_2]$ shartidan rotor chulg'amining keltirilgan induktiv qarshiligi x'_2 ni aniqlaymiz:

$$x'_2 = (E'_2 / E_2) \cdot (I'_2 / I_2) \, x_2 = k_E k_I x_2 = k_z \cdot x_2. \qquad (11.18)$$

(11.17) va (11.18) formulalardagi $k_E \cdot k_I = k_z$ — rotor chulg'ami *qarshiliklarini keltirish koeffitsienti* deyiladi.

"Olmaxon katagi" tipdagi qisqa tutashgan chulg'am uchun k_E, k_I va k_z koeffitsientlarni aniqlashda $w_2 = 0{,}5$; $m_2 = Z_2$ va $k_{ch.2} = 1$ deb qabul

qilinadi. Unda $k_E = 2w_1k_{ch.1}$; $k_I = 2\ m_1 \cdot w_1 k_{ch.1} / Z_2$; $k_z = 4\ m_1 \cdot (w_1\ k_{ch.1})^2 / Z_2$. Bunda Z_2 — rotor chulg'ami sterjenlari soni (har bitta pazda bittadan sterjen), demak, rotor chulg'amida bir-biridan $\alpha = 2\pi / Z_2$ burchakka siljigan $m_2 = Z_2$ ta "fazalari" bo'lib, juft qutblar soni p_2 esa hamma vaqt aylanma magnit maydon juft qutblari soni p_1 ga teng ($p_2 = =p_1$) bo'ladi.

Chulg'am parametrlari stator chulg'amiga keltirilgan rotor qo'zg'almas bo'lganda asinxron mashinaning EYK lari hamda toklari muvozanat tenglamalari transformatornikiga o'xshagan holda quyidagicha yoziladi:

$$\left.\begin{aligned} \underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 + \underline{I}_1(r_1 + jx_1), \\ \underline{E}'_2 &= \underline{I}'_2(r'_2/s + jx'_2); \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_0 + (-\underline{I}'_2). \end{aligned}\right\} \qquad (11.19)$$

Shunday qilib, rotori qo'zg'almas bo'lgan asinxron mashinalarning nazariyasi transformatorlarniki kabi bo'lar ekan.

Rotori qo'zg'almas bo'lgan asinxron mashinalar asosan ***induksion regulator*** va *fazoregulator* sifatida ishlatiladi.

11.3. Rotori aylanayotgan asinxron mashinada elektromagnit jarayon, vektor diagrammasi va almashtirish sxemalari

Elektromagnit jarayon. Asinxron mashina normal sharoitda ishlayotganda uning rotori stator chulg'ami hosil qilgan aylanma magnit maydon yo'nalishida $n < n_1$ aylanish chastota bilan aylanadi. Shuning uchun stator aylanma maydonining rotorga nisbatan aylanish chastotasini $n_1 - n$ ayirma bilan aniqlanadi. Bu holda stator chulg'amining asosiy magnit oqimi Φ rotorni $n_s = n_1 - n$ aylanish chastotada kesib o'tib uning chulg'amida EYK E_{2s} ni hosil qiladi ("s" indeksi — sirpanishdagi degan ma'noni beradi):

$$E_{2s} = 4{,}44 \cdot f_2 \cdot w_2 \cdot k_{ch.2} \cdot \Phi_{max}. \qquad (11.20)$$

Bundagi rotor chulg'ami EYK E_{2s} ning chastotasi f_2 quyidagicha topiladi:

$$f_2 = p\ n_s / 60 = p(n_1 - n) / 60. \qquad (11.21)$$

Bu tenglamaning o'ng tomonini n_1 / n_1 ga ko'paytirib, $p\ n_1 / 60 = f_1$

va $(n_1 - n)/ n_1 = s$ larni hisobga olgan holda (11.21) ni quyidagicha yozish mumkin:

$$f_2 = f_1 \cdot s, \qquad (11.22)$$

ya'ni rotor chulg'amidagi EYK chastotasi sirpanishga mutanosib bo'lar ekan.

Aylanuvchi rotor chulg'amining EYK E_{2s} ni quyidagicha topish mumkin:

$$E_{2s} = 4{,}44\, f_2\, w_2\, k_{ch.2}\, \Phi_{max} = 4{,}44\, f_1 \cdot s \cdot w_2\, k_{ch.2} \cdot \Phi_{max} = E_2 \cdot s. \quad (11.23)$$

bu yerda $E_2 = 4{,}44 \cdot f_1 \cdot w_2 k_{ch.2} \cdot \Phi_{max}$ – rotori tormozlangan asinxron mashina EYK.

Vektor diagramma. Asinxron mashinaning vektor diagrammasi (11.19) tenglamalar sistemasi asosida qurilib transformator diagrammasini qurish tartibiga o'xshash bo'ladi (4-bobning 4.2-bandiga qarang).

Lekin asinxron mashinada aylanma maydon mavjudligi birlamchi va ikkilamchi chulg'amlardagi toklarning o'zaro ta'sirida ayrim *o'ziga xos xususiyatlarni yuzaga keltiradi*. Rotor chulg'ami fazalari *fazoda siljigan*, toklari esa *vaqt bo'yicha siljiganligidan* ular rotorda MYK F_2 ning yuguruvchi to'lqinini yaratadi. Uning aylanish chastotasi quyidagiga teng bo'ladi:

$$n_{F_2} = 60\, f_2 / p_2 = 60\, f_1 / p_1, \qquad (11.24)$$

bunda: f_2 va p_2 – rotor tokining chastotasi va juft qutblari soni;

rotori qo'zg'almas bo'lganda stator va rotor EYK lari chastotasi $f_2 = f_1$ bo'ladi.

Asinxron mashina ishlashi uchun stator va rotor yuguruvchi F_1 va F_2 MYK to'lqinlarining aylanish chastotalari teng bo'lishi zarur. Demak, rotorning fazalar sonidan qat'i nazar, uning juft qutblari soni bir xil (ya'ni $p_2 = p_1 = p$) bo'lishi shart.

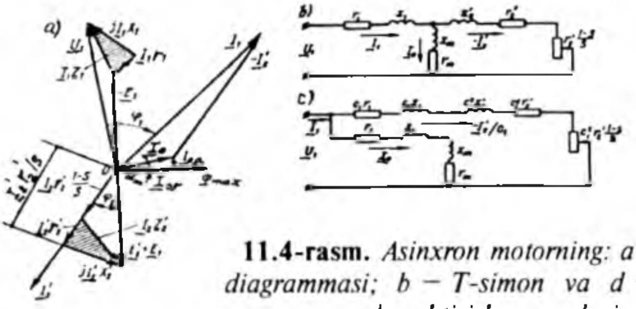
Vektor diagrammaning rotor zanjiri uchun qurishda EYK E'_2 va tok I'_2 vektorlari orasidagi siljish burchagi quyidagicha hisoblanadi:

$$\psi_2 = \operatorname{arctg}(x'_2 s)/ r'_2. \qquad (11.25)$$

11.4,*a*-rasmda asinxron motorning vektor diagrammasi ko'rsatilgan. Bu diagramma *transformatorning vektor diagrammasidan faqat shu bilan farq qiladiki*, rotor chulg'amida (ikkilamchi chulg'amda) kuchlanish pasayishlarining yig'indisi $n = 0$ da rotor chulg'amining EYK E'_2 bilan muvoznatlashadi. *Bunga sabab shuki*, rotor chulg'ami transformatorning ikkilamchi chulg'ami singari yuklamaga ulangan emas, balki qisqa

tutashtirilgan. Lekin, agar kuchlanish pasayishi $\overline{0A} = \underline{I}'_2 r'_2[(1-s)/s)]$ ni rotor chulg'amining klemmalariga ulangan ma'lum yuklama $r'_2[(1-s)/s)]$ dagi kuchlanish sifatida qaralsa, u holda asinxron motorning vektor diagrammasini ikkilamchi chulg'amining klemmalariga o'zgaruvchan qarshilik $r'_2[(1-s)/s)]$ ulangan transformatorning vektor diagrammasi sifatida qarash mumkin. Boshqacha aytganda, asinxron motor elektr jihatdan aktiv yuklama $r'_2[(1-s)/s)]$ da ishlaydigan transformatorga o'xshaydi.

Asinxron motorda magnitlovchi tokning transfomatornikiga nisbatan miqdor jihatdan ancha kattaligi sababli ularning almashtirish sxemalari bir-biridan farq qilishiga olib keladi. Agar transformator nazariyasida magnitlovchi konturni ayrim hollarda amaliy hisoblarda e'tiborga olinmasa, asinxron motor ishini tahlil qilganda bunday yondashib bo'lmaydi, chunki bu holda ancha xatolikka yo'l qo'yilgan bo'ladi.



11.4-rasm. *Asinxron motorning: a — vektor diagrammasi; b — T-simon va d — G-simon almashtirish sxemalari.*

Almashtirish sxemalari. Asinxron mashinalarining toki, quvvati va kuchlanish pasayishini aniqlash uchun almashtirish sxemasidan foydalaniladi. Mashinaning almashtirish sxemasi uning asosiy (11.19) tenglamalari asosida quriladi. Almashtirish sxema bir-biriga elektromagnit vositasida bog'langan stator va rotor zanjirlari parametrlarining qarshiliklari orqali ko'rsatiladi.

T-simon almashtirish cxemasi. 11.3,*b*-rasmda asinxron mashinaning T- simon almashtirish sxemasi ko'rsatilgan. Bu sxema asosiy uchta shoxobchadan:

1) qarshiliklari r_1, x_1 va toki $\underline{I}_1$ bo'lgan stator zanjiri;

2) qarshiliklari r_0, x_0 va toki $\underline{I}_0$ bo'lgan magnit zanjiri;

3) qarshiliklari $r_2' + r_2' \cdot (1-s)/s = r_2'/s$, x_2', va toki ($-\underline{I}_2'$) bo'lgan rotor zanjiridan iborat.

Asinxron motorning magnit jihatdan bog'langan stator va rotor chulg'amlari T-simon almashtirish sxemasida (11.4,*b*-rasm) stator va rotor elektr zanjirlari bilan almashtirilgan. Bundagi aktiv qarshilik $r_2' \cdot (1-s)/s$ ni qo'zg'almas rotor chulg'amiga ulangan tashqi qarshilik sifatida qarash mumkin bo'ladi. Bu holda asinxron mashina aktiv yuklama ulangan transformator sifatida ishlaydi va bu jarayonda sxemadagi $r_2' \cdot (1-s)/s$ qarshilik yagona o'zgaruvchan parametr hisoblanadi.

Bu qarshilikning qiymati sirpanish bilan, demak, asinxron motorning valiga qo'yiladigan mexanik yuk bilan aniqlanadi. Masalan, agar motor validagi foydali (yuk) momenti $M_2 = 0$ bo'lsa, u holda sirpanish $s \approx 0$ bo'lganligidan $r_2' \cdot (1-s)/s = \infty$ bo'lib, bu hol motorning salt ishlash rejimiga mos keladi. Agar valdagi yuk momenti aylantiruvchi momentdan katta bo'lsa, u holda motorning rotori to'xtaydi, demak, $s = 1$ bo'ladi. Bunda $r_2' \cdot (1-s)/s = 0$ bo'lib, bu hol asinxron motorning qisqa tutashuv rejimiga mos keladi.

T-simon almashtirish sxema ish jarayonni to'la aks ettiradi, lekin unda bir-biriga ta'sirlashadigan konturlar mavjud bo'lib, ularni hisobga olish ancha murakkabligi uning kamchiligi hisoblanadi. Shuning uchun amaliyotda soddalashtirilgan G-simon almashtirish sxema ishlatiladi (11.4,*d*-rasm). Bunda soddalashtirish magnitlovchi kontur ($Z_0 = r_0 + jx_0$)ni umumiy klemmalariga chiqarish bilan amalga oshiriladi. Bunda magnitlovchi tokning qiymati o'zgarmay qolishi uchun bu konturga r_1 va x_1 qarshiliklar ketma-ket ulanadi. Almashtirishning hosil qilingan sxemasida stator va rotor konturlarining qarshiliklari ketma-ket ulangan bo'lib, ular ish konturini hosil qiladi. Magnitlovchi kontur ana shu konturga parallel ulangan bo'ladi; bu holda konturlar bir-biri bilan ta'sirlashmaydi.

G-simon almashtirish sxemasi ish konturining parametrlarini hisoblashda aniqlik qilishni talab etadi, ya'ni ideal salt ishlashda (s=0) tarmoq kuchlanishi U_1 ning stator chulg'ami EYK E_1 ga nisbati bilan aniqlanadigan $\underline{s}_1 = U_1/E_1$ kompleks koeffitsientini hisoblash formulalariga kiritish bilan amalga oshiriladi.

G-simon almashtirish sxema uchun quyidagilarni yozish mumkin:

$\underline{I}'_1 = \underline{I}'_0 + (-\underline{I}'_2); \; I'_2 = \underline{I}'_2 / s_1$ (11.26)

bu yerda: $\underline{I}'_1$ va $\underline{I}'_2$ — tegishlicha T-simon va G-simon almashtirish sxemasining ish konturi toklari; hisoblarda $\underline{I}''_0 \approx \underline{I}_0$ deb olganda xatolik kam bo'ladi;

$$\underline{c}_1 = 1 + (r_1 + jx_1)/(r_0 + jx_0) \quad (11.27)$$

— G-simon almashtirish sxemaga kiritilgan kompleks son.

Bu sxemada kompleks $\underline{c}_1$ ni uning moduli s_1 bilan almashtirish mumkin. Quvvati 10 kW dan katta bo'lgan asinxron mashinalar uchun $c_1 = 1{,}02 \div 1{,}05$.

Asinxron mashinalardagi elektromagnit jarayonlarni tahlil qilish uchun ko'pincha $s_1 = 1$ deb olinadi va hisob ishlarini yengillashtirib olingan natijalarning aniqligiga uncha ta'sir qilmaydi. G-simon almashtirish sxemasi magnitlovchi konturi ko'chirilgan *soddalashtirilgan almashtirish sxemasi* deyiladi.

Aylanayotgan rotor zanjirining toki sirpanish s da (11.22) va (11.23) larni hisobga olgan holda quyidagiga bo'ladi:

$$I_{2s} = E_2 s / \sqrt{r_2^2 + (x_2 \cdot s)^2} \; . \quad (11.28)$$

G-simon almashtirish sxemadan ish konturidagi tok qiymati quyidagicha hisoblanadi:

$$I'_2 = U_1 / \sqrt{(r_1 + c_1 r'_2 / s)^2 + (x_1 + c_1 x'_2)^2} \; . \quad (11.29)$$

11.4. Uch fazali asinxron motorning energetik diagrammasi

Asinxron mashina motor rejimida ishlayotganda (11.4-rasm) u tarmoqdan elektr energiyani oladi va uni mexanik energiyaga aylantirib beradi. Bu jarayonda motorda energiya isroflari bo'ladi. Asinxron motor tarmoqdan

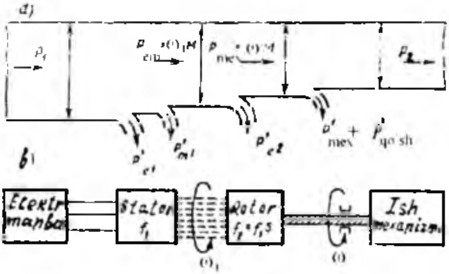
$$P_1 = m_1 \cdot I_1 \cdot U_1 \cdot \cos\varphi_1 \quad (11.30)$$

aktiv quvvatni oladi. Bu quvvatning bir qismi stator chulg'amidagi elektr isroflari P'_{e1} ni

$$P'_{e1} = m_1 \cdot I_1^2 r_1 \; . \quad (11.31)$$

va stator po'lat o'zagidagi magnit isroflari P'_{m1} ni qoplashga sarf bo'ladi:

Aylanma magnit maydon vositasida rotorga elektromagnit quvvat P_{em} uzatiladi:



11.5-rasm. *Asinxron motorning energetik diagrammasi.*

$$P_{em} = P_1 - P'_{e1} - P'_{m1}. \qquad (11.32)$$

Elektromagnit quvvatning bir qismi rotor zanjiridagi elektr isrofi (P_{e2})ni qoplash uchun sarflanadi:

$$P'_{e2} = m_2 \cdot I_2^2 r_2 = m_1 \cdot (I'_2)^2 r'_2. \qquad (11.33)$$

Elektromagnit quvvat P_{em} ning qolgan qismi esa to'la mexanik quvvat $P_{2(mex)}$ ga aylanadi:

$$P_{2(mex)} = P_{em} - P'_{e2}. \qquad (11.34)$$

Motor ishlaganda podshipniklarning ishqalanishi va aylanuvchi qismlarining havoda ishqalanishi oqibatida ham quvvat isrofi bo'ladi.

Bundan tashqari tarqoq magnit oqimlari, stator va rotor po'lat o'zagi tishlarida hamda yaxlit po'lat qismlarida magnit maydonning o'zgarib turishi natijasida ham qo'shimcha quvvat isroflari bo'ladi.

Asinxron motorning to'la mexanik quvvati P_2 mexanik isrof P'_{mex} va qo'shimcha $P'_{qo'sh}$ isroflarni ayirib, motor orqali ishchi mexanizmga uzatilayotgan foydali quvvat P_2 aniqlanadi.

$$P_2 = P_{mex} - (P'_{mex} + P'_{qo'sh}). \qquad (11.35)$$

Nazorat savollari:

1. *Asinxron motorning ishlash prinsipini so'zlab bering.*
2. *Asinxron mashinaning qanday ish rejimlarini bilasiz?*
3. *Asinxron motorning T va G-simon almashtirish sxemalarini tahlil qiling.*

12-BOB. ASINXRON MASHINANING ELEKTROMAGNIT MOMENTI VA MEXANIK XARAKTERISTIKALARI

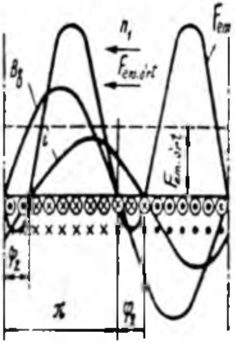
12.1. Asinxron mashinaning elektromagnit momenti

Elektromagnit momentni ikki xil yo'l bilan, ya'ni: a) elektromagnit kuchlar va b) elektromagnit quvvat orqali aniqlash mumkin. Quyida shularni alohida ko'rib chiqamiz.

Elektromagnit momentni elektromagnit kuchlar orqali aniqlash. Asinxron mashinaning elektromagnit momenti rotor chulg'ami o'tkazgichlaridan o'tadigan *tok aktiv tashkil etuvchisi* (I_2 cosyy$_2$) ning stator chulg'ami hosil qilgan aylanma maydon, ya'ni magnit oqim F_{max} bilan ta'sirlashib Amper qonuniga asosan elektromagnit kuch $F_{em} = Bd_d\, li$ vujudga keladi (12.1-rasm). Bu kuch hosil qilgan elektromagnit moment quyidagicha aniqlanadi:

$$M = C_M\ \Phi_{max} I_2 \cos\psi_2\ , \qquad (12.1)$$

bunda: $C_M = p \cdot m_2 \cdot k_{ch\,2} / \sqrt{2}$ – o'zgarmas kattalik; Φ_{max} – magnit oqimning maksimal qiymati.



12.1-rasm. *Mashina havo oralig'ining magnit induksiyasi (B_δ) rotor chulg'ami toki (i) va asinxron mashina chulg'amlari o'tkazgichlariga ta'sir qiladigan elektromagnit kuch (F_{em}) larning taqsimlanish egri chiziqlari.*

(12.1) formula faqatgina asinxron mashinalar uchungina to'g'ri bo'lib qolmay, balki elektr mashinalarining barcha turlari uchun ham to'g'ridir. Bu formula moment qiymatining motorda sodir bo'ladigan fizik hodisalar orasidagi bog'lanishni o'rnatadi. Undan motorning har xil rejimlardagi ish jarayonini sifat jihatdan tahlil qilishda foydalanish qulay hisoblanadi. Lekin bu formulaga kirgan (Φ_{max}, I_2 va $\cos\psi_2$) kattaliklar to'g'ridan to'g'ri tarmoq kuchlanishi va mashinaning ish

rejimi bilan bog'lanmagan, ularni tajribada aniqlash esa ancha murakkabdir. Shu sababli quyida elektromagnit (aylantiruvchi) momentning qiymatini eng oddiy aniqlash, unga mashinaning har xil parametrlari va ekspluatatsion rejimlarining ta'sirini hisobga olish imkonini beradigan boshqa formulasi keltirib chiqarilgan.

Elektromagnit momentni elektromagnit quvvat orqali aniqlash.

Energetik diagrammadan (11.5-rasm) aniqlangan elektromagnit (P_{em}) va mexanik quvvat (P_{mex})larni elektromagnit moment orqali ifodalaymiz:

$$P_{em} = M\,\omega_1;\; P_{mex} = M\,\omega, \qquad (12.2)$$

bu yerda: $\omega_1=(2\pi\cdot n_1/60)\cdot(p/p) = (2\pi/p)\cdot(p\ n_1/60) = 2\pi\cdot f/p$ va $\omega = 2\pi\cdot n/\ 60$ tegishlicha statordagi aylanma magnit maydonning va rotorning burchak tezliklari.

(12.2) ga asosan elektromagnit moment quyidagiga teng bo'ladi:

$$M= P_{em}/\ \omega_1. \qquad (12.3)$$

Demak, asinxron motorning elektromagnit momenti, uning elektromagnit quvvatiga mutanosib bo'lar ekan.

Energetik diagrammadan foydalanib rotor chulg'amidagi isroflarni aniqlashning quyidagi ifodalarini yozish mumkin:

$$P'_{e2} = P_{em} - P_{mex} \qquad (12.4)$$

yoki

$$P'_{e2} = M\omega_1 - M\omega = M(\omega_1 - \omega). \qquad (12.5)$$

(12.5) fomulaning o'ng tomonini (ω_1/ω_1) nisbatga ko'paytirib quyidagini olamiz:

$$P'_{e2} = M\omega_1 \cdot s. \qquad (12.6)$$

(12.6) formuladan quyidagiga ega bo'lamiz:

$$M= P'_{e2}/(\omega_1\cdot s) = m_1\,(I'_2)^2\cdot r'_2\,/\ (\omega_1 s), \qquad (12.7)$$

ya'ni asinxron motorning elektromagnit momenti rotor chulg'amida elektr isroflari quvvatiga mutanosib bo'lar ekan.

Agar G-simon almashtirish sxemasidan foydalanib (11.29) bo'yicha aniqlangan rotor toki I'_2 ning qiymatini (12.7) ga qo'yib, ($\omega_1=2\pi\cdot f_1/p$) ni ham hisobga olgan holda asinxron mashinaning elektromagnit momentini aniqlash formulasining umumiy ko'rinishiga ega bo'lamiz:

$$M = (m_1 p\ U_1^2\ r_2') / \{(2\pi \cdot f_1 \cdot s) \cdot [(r_1 + r_2'/s)^2 + (x_1 + x_2')^2]\}. \quad (12.8)$$

(12.8) formuladan quvvati P>10 kW bo'lgan asinxron motorlar uchun moment M ni hisoblashda almashtirish sxemadagi kompleks son $c_1 \approx 1$ deb qabul qilingan. Elektromagnit momentni hisoblashda ko'proq aniqlik talab qilinganda kompleks son c_1 hisobga olingan (12.8) ifoda quyidagicha yoziladi:

$$M = (m_1 p\ U_1^2\ r_2') / \{(2\pi \cdot f_1 \cdot s) \cdot [(r_1 + c_1 r_2'/s)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2]\}, \quad (12.8,a)$$

bu yerda $c_1 \approx 1{,}02 \div 1{,}05$ – quvvati $P \leq 10$ kW bo'lgan asinxron motor uchun.

(12.8) va (12.8,a) larda sirpanish s dan boshqa hamma kattaliklar o'zgarmas hisoblanib, u valdagi mexanik yukka mutanosib ravishda o'zgaradi.

12.2. Asinxron mashinaning mexanik xarakteristikalari va asinxron motorning turg'un ishlash shartlari

Ko'rilayotgan asinxron mashinani ideal mashina deb hisoblab, undagi mexanik isroflar (qiymati kichikligidan) e'tiborga olinmasa, elektromagnit moment M valdagi moment M_{yu} ga teng deb hisoblagan holda, quyidagi tahlillarda "elektromagnit moment M" tushunchasi o'rniga asosan "aylantiruvchi moment M" tushunchasi ishlatiladi.

Stator chulg'amiga beriladigan kuchlanish $U_1 = U_{1N}$ bo'lgandagi $M = f(n)$ yoki $M = f(s)$ ko'rinishdagi bog'lanishga asinxron motorning *mexanik xarakteristikasi* (12.2,*a*-rasm) deyiladi.

Aylantiruvchi momentning sirpanishga bog'liqligi (yoki mexanik xarakteristika) – $M = f(s)$. Mexanik xarakteristikani qurish uchun

$$M = (m_1 p\ U_1^2\ r_2') / \{(2\pi \cdot f_1 \cdot s) \cdot [(r_1 + r_2'/s)^2 + (x_1 + x_2')^2]\}$$

formuladan foydalanish mumkin.

Sirpanish s ga qiymatlar berib, parametrlari ma'lum bo'lgan asinxron motor uchun izlangan mexanik xarakteristikani qurish mumkin (12.2,*a*-rasm).

Maksimal momentga to'g'ri keladigan sirpanishni *kritik sirpanish* s_{kr} deyiladi. Uning qiymatini aniqlash uchun (parametrlari o'zgarmas deb hisoblagan holda) momentdan sirpanish bo'yicha birinchi hosila olib, uni nolga tenglaymiz (ya'ni $dM / ds = 0$), bunda umumiy hol uchun quyidagi natijaga ega bo'lamiz:

$$s_{kr} = \pm c_1 r'_2 / \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2)^2} \,. \qquad (12.9)$$

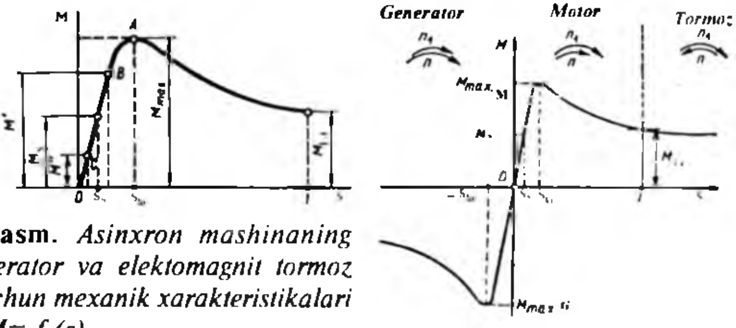
Agarda $c_1 \approx 1$ va qiymati ancha kichikligidan $r_1 \approx 0$ deb olinsa, u holda kritik sirpanish s_{kr} ni aniqlash formulasi quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$s_{kr} = \pm\, r'_2 / (x_1 + x'_2) = \pm\, r'_2 / x_{qt} \,, \qquad (12.9,a)$$

Maksimal (kritik) moment M_{max} ning qiymatini aniqlash uchun (12.9) dan s_{kr} ning qiymatini (12.8,a) ga qo'yib hisoblanadi:

$$M_{max} \approx \pm(1/2)\, m_1 \cdot p \cdot U_1^2 \;/\; \{2\pi f_1 \cdot c_1 \cdot [\, \pm\, r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2)^2}\,]\}, \qquad (12.10)$$

(12.9), (12.9,a) va (12.10)larda musbat (+) ishora motor rejimiga, manfiy (−) ishora esa generator rejimiga tegishli (12.2,*b*-rasm).



12.2-rasm. *Asinxron mashinaning motor, generator va elektomagnit tormoz rejimlari uchun mexanik xarakteristikalari (a, b) — M= f (s).*

Umumiy maqsadli asinxron mashinalar uchun stator chulg'amining aktiv qarshiligi induktiv qarshiliklar yig'indisidan ancha kichik [$r_1 < (x_1 + x_2)$, ya'ni taxminan 10÷12 foizini tashkil qiladi xolos] bo'lganligidan $r_1 \approx 0$ deb hamda $s_1 \approx 1$ ekanligini e'tiborga olgan holda M_{max} ni aniqlashning soddalashgan ifodasiga ega bo'lamiz:

$$M_{max} \approx \pm(1/2)\, m_1 \cdot p \cdot U_1^2 \;/\; [2\pi f_1 \cdot (x_1 + x'_2)], \qquad (12.10,a)$$

(12.10) *ifodaning tahlili shuni ko'rsatadiki*, asinxron mashina generator rejimda ishlaganida uning maksimal momenti $M_{max\,G}$ motor rejimdagi maksimal momenti $M_{max\,M}$ ga nisbatan kattaroq bo'ladi. *Bunga sabab*, generator rejimda (12.10) ning maxrajidagi r_1 ning ishorasi minus

" – " olinib kasrning maxrajidagi son motor rejimdagiga nisbatan kichikroq bo'lganligidandir. Asinxron motorning maksimal momenti tarmoq kuchlanishi kvadratiga mutanosib ekan, ya'ni $M \equiv U_1^2$. Bu esa *uning kamchiligi* hisoblanadi, chunki kuchlanish, masalan, 10 % ga kamaysa elektromagnit moment $M' = 0{,}9^2 \cdot M = 0{,}81 \cdot M_N$ ga, ya'ni 19 % ga kamayadi.

Asinxron motor maksimal momentining karraligi $k_M = M_{max}/M_N$ standart tomonidan qat'iy belgilangan bo'ladi, ya'ni $k_M \geq 1{,}8$. Ayrim maxsus asinxron motorlarda k_M ning qiymati 3,0 gacha yetadi. Bu koeffitsient asinxron motorning *o'ta yuklanish qobiliyatini* xarakterlaydi.

(12.9) va (12.10) formulalarning tahlilidan quyidagi muhim xulosalar qilish mumkin:

1) kritik sirpanish s_{kr} rotor zanjirining aktiv qarshiligi r'_2 ga mutanosib ravishda o'zgaradi;

2) maksimal moment M_{max} ning qiymati rotor zanjiri aktiv qarshiligi r'_2 ga bog'liq emas;

3) asinxron motorning maksimal momenti M_{max} va o'ta yuklanish qobiliyati k_M asosan stator va rotor chulg'amlari tarqoq induktiv qarshiliklari (tegishlicha x_1 va x'_2)ga teskari mutanosibda bo'ladi;

4) maksimal moment M_{max} har qanday sirpanishdagi moment singari U_1^2 ga mutanosibdir, ya'ni berilayotgan kuchlanish kamayganda motorning o'ta yuklanish qobiliyati pasayadi.

$M = f(s)$ – mexanik xarakterstikaning *motor rejimda o'zgarish xarakteri quyidagicha tushuntiriladi*. Yuk momenti salt ishlash rejimidan oshirilsa, sirpanish s oshadi. Bunda *aktiv-induktiv xarakterli* rotor zanjiri qarshiligidan o'tadigan tok $\underline{I}'_2$ ni va uning shu zanjirdagi EYK $\underline{E}'_2$ dan orqada qoluvchi ψ_2 burchakni hisoblash formulalariga:

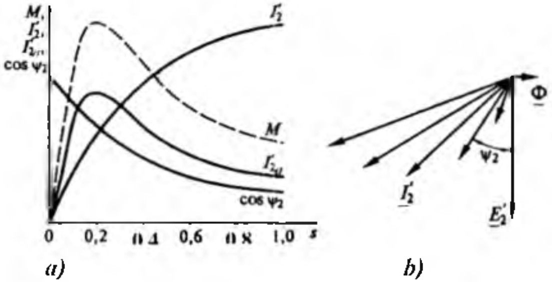
$$\underline{I}_2 = s \cdot \underline{E}_2 / (r_2 + jsx_2) = \underline{E}_2 / (r_2/s + jx_2), \qquad (12.11)$$

$$\psi_2 = \mathrm{arctg}(x_{2s}/ r_2) = \mathrm{arctg}(s \cdot x_2/ r_2) = \mathrm{arctg}[(x_2/ (r_2/s)] \qquad (12.12)$$

asosan rotor toki $\underline{I}_2$ va faza siljish burchagi ψ_2 oshadi, $\cos\psi_2$ esa kamayadi. Sirpanish osha borgan sari rotor tokining induktiv xarakteri tobora osha boradi, uning aktiv tashkil etuvchisi esa avval (ψ_2 kichik paytda) oshib, so'ngra (umumiy tokning oshishidan qat'iy nazar) kamaya boradi (12.3,*b*-rasm), chunki EYK $\underline{E}_2$ va tok $\underline{I}_2$ orasidagi siljish burchak ψ_2 oshadi.

$M = f(s)$ bog'lanishning o'zgarish xarakterini asinxron motorning ishlash prinsipidan kelib chiqqan holda analitik yo'l bilan ham isbotlash mumkin, ya'ni (12.1) ga asosan uning elektromagnit momenti ishchi

oqim Φ va rotor tokining aktiv tashkil etuvchisi I'_{2a} larning ko'paytmasiga mutanosibdir. Bundan, Φ = const bo'lganda mexanik xarakteristikaning o'zgarish xarakteri $I'_{2a} = f(s)$ grafigi bilan aniqlanar ekan.



12.3-rasm. *Asinxron motorning mexanik xarakteristikasi o'zgarish shaklini tushuntirishga oid chizma (a) va uning validagi yuk o'zgarganda rotor tokining vektor diagrammasi (b).*

Ishga tushirish momenti. Asinxron motorning stator chulg'amini elektr tarmog'iga ulab ishga tushirish paytdagi momenti $M_{i.t}$ ni aniqlash uchun (12.8,a) formulaga sirpanish s = 1 qo'yiladi, natijada quyidagi ifodaga ega bo'lamiz:

$$M_{i.t} = (p\, m_1\, U_1^2\, r_2') \,/\, [\,(r_1+s_1 r_2')^2 + (x_1+s_1 x_2')^2] \,. \qquad (12.13)$$

Bundagi o'rta qavs ichidagi qarshiliklar $r^2_{qt}+x^2_{qt} = z^2_{qt}$ ekanligini hisobga olib ishga tushirish momentining quyidagi ifodasini olamiz:

$$M_{i.t} = (pm_1\, U_1^2\, r_2') \,/\, (2\pi f_1 \cdot z^2_{qt}) = pm_1 / (2\pi f_1) \cdot I_{i.t}^2 \cdot r_2' \,, \qquad (12.14)$$

bunda $I_{i.t}$ – sirpanish s =1 bo'lgandagi ishga tushirish toki.

(12.14) dan ko'rinishicha, motorning ishga tushirish momenti asosan ishga tushirish tokining kvadrati $I_{i.t}^2$ ga mutanosib bo'lar ekan. Undan tashqari zarurat tug'ilganda qisqa tutashgan rotorlida "olmaxon katagi" tipidagi chulg'amni qarshiligi oshirilishi mumkin bo'lgan maxsus konstruksiyada ishlab chiqarish, *faza rotorlida esa* rotor chulg'amiga qo'shimcha aktiv qarshilik ulash yo'li bilan ishga tushirish momentini oshirish mumkin ekan.

Standartning talabi bo'yicha asinxron motor nominal yukda ishga tushishi uchun quyidagi shart bajarilishi, ya'ni ishga tushirish momentining karraligi $k_{i.t} = M_{i.t} / M_{max} \geq 1$ bo'lishi kerak.

Mexanik xarakteristikani katalog qiymatlari yordamida qurish. (12.7) va (11.28) formulalarga asosan asinxron motorning elektromagnit momenti quyidagiga teng:

$$M = P'_{e2} / (\omega_1 s) = m_2 \cdot I_2^2 \cdot r_2 / (\omega_1 s) =$$

$$= m_2 \cdot sE_2^2 \cdot r_2 / [\omega_1 (r_2^2 + s^2 x_2^2)]. \qquad (12.15)$$

Motor validagi mexanik yukning o'zgarishi bilan magnit oqim o'zgarmaydi, shu sababli $E_2 \approx const$ deb hisoblash mumkin. (12.8) formuladan topilgan momentdan sirpanish bo'yicha birinchi hosila olgandan keyin, uni 0 ga tenglab ($dM/ds = 0$), kritik sirpanish s_{kr} ni topish mumkin, ya'ni $s_{kr} = \pm r_2 / x_2$. U holda maksimal moment quyidagiga teng bo'ladi:

$$M_{max} = \pm m_2 E_2^2 / (2\omega_1 x_2). \qquad (12.16)$$

(12.15) ni (12.16) ga bo'lib ixchamlashtirishdan keyin nisbiy birliklarda hisoblashga qulay bo'lgan quyidagi soddalashgan formulaga ega bo'lamiz:

$$M / M_{max} \approx 2 / (s_{kr} / s + s / s_{kr}). \qquad (12.17)$$

Bu formulani *Kloss formulasi* deyiladi va u ba'zan amaliyotda taxminiy hisoblar uchun qo'llaniladi.

(12.17) formula bo'yicha hisoblashda aniqlik past bo'ladi, chunki stator chulg'amidagi kuchlanish pasayishini hisobga olmaydi. Ammo asinxron motorning bitta rejimini tekshirishda, ya'ni sirpanishning kichik qiymatlarida ($s = 0$ dan s_{kr} gacha) magnit oqim juda kam o'zgaradi va bu formula amaliyotda dastlabki tahlil uchun tezkor natijani beradi.

Asinxron motorning turg'un ishlash shartlari. Motor ishining turg'unligi deb validagi mexanik yukning qisqa muddat ichida keskin oshishi va stator chulg'amiga berilayotgan tarmoq kuchlanishi qiymatining kamayishida barqaror aylanish chastotasini tiklay olish qobiliyatiga aytiladi.

Mexanikadan ma'lumki, motor rotoriga qo'yilgan momentlarning muvozanat tenglamasi quyidagicha yoziladi:

$$M = M_{st} - J \cdot d\omega / dt, \qquad (12.18)$$

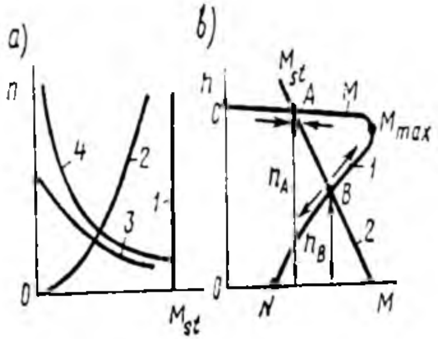
bu yerda: M – motorning elektromagnit momenti; $M_{st} = M_0 + M_2$ – valdagi teskari ta'sir etuvchi statik moment; $J \cdot d\omega / dt$ – aylanuvchi massalar inersiyasi J va rotorning tezlanishi $d\omega / dt$ larga bog'liq bo'lgan *dinamik moment*.

$M = M_{st}$ bo'lganda rotor tezlanishi 0 ga teng:

$$d\omega / dt = (M - M_{st}) / J = 0, \qquad (12.19)$$

ya'ni rotor barqaror chastotada aylanadi. Agar $M > M_{st}$ bo'lsa, rotorning

12.4-rasm. *Ba'zi bir ishlab chiqarish mexanizmlarining mexanik xarakteristikalari (a): 1 — yuk ko'tarish mexanizmlari (kran, lift); 2 — ventilatorlar, markazdan qochirma nasoslar; 3 — beton-qorgichlar, sharli tegirmonlar; 4 — tortish elektr yuritmasi; b — asinxron motor statik turg'unligini aniqlash uchun grafiklar.*



aylanish chastotasi tezlashadi, $M < M_{st}$ bo'lganda esa — sekinlashadi.

Turg'unlik asinxron motor ishlayotgan konkret shartlardan bog'liq bo'ladi, xususan, motorning va u yuritayotgan ishlab chiqarish mexanizmlari mexanik xarakteristikalarining o'zgarish shakliga bog'liq bo'ladi.

Aylanish chastotaning oshishi bilan yuk momenti M_{st} kamayadigan (12.4,*b*-rasmda, 2-mexanik xarakteristika) ishlab chiqarish mexanizmini yuritayotgan asinxron motorning ishini ko'rib chiqamiz. Bu holda $M = M_{st}$ sharti A va B nuqtalarda aylanish chastotalari mos ravishda n_A va n_V bo'lganda bajariladi. Ammo B nuqtada motor turg'un ishlay olmaydi, chunki yuk momenti M_{st} ozgina o'zgarganda aylanish chastotasi barqaror qiymatidan og'ishi natijasida bu farqni oshiradigan ortiqcha sekinlashtiruvchi yoki tezlashtiruvchi moment $\pm (M - M_{st})$ vujudga keladi. Masalan, tasodifan statik moment M_{st} oshganda motor rotorining aylanish chastotasi *n* kamayadi. Mashina 1-mexanik xarakteristika ($M_{max} - n_0$ qismi)ning "B" nuqtasida ishlaganida elektromagnit moment M ning kamayishiga, demak, $M - M_{st}$ ayirmaning oshishiga olib keladi va, natijada rotorning sekinlashishi uning to'la to'xtagunicha davom qiladi.

Agar statik moment M_{st} tasodifan kamaysa, rotorning aylanishi tezlashadi va elektromagnit moment yana oshadi. Bu jarayon mexanik xarakteristikasi (1)ning "A" nuqtasida $M=M_{st}$ muvozanat hosil bo'lguna qadar shunday davom qiladi. Bu nuqtada rejim turg'un bo'ladi, chunki bu holda tasodifan M_{st} oshsa va rotorning aylanish chastotasi *n* kamaysa motorning elektromagnit momenti M oshib, yuk momenti M_{st} ning yangi qiymatiga teng bo'lganda yana barqaror ishlaydi, lekin bunda aylanish chastota biroz kam bo'ladi.

Shunday qilib, asinxron motor mexanik xarakteristikaning C – M_{max} qismida ishlaganida ichki o'z-o'zini rostlash xossasiga ega bo'lib, uning aylantiruvchi momenti $M=M_{st}$ *qonuni bo'yicha* avtomatik rostlanadi (bunday rostlash statik rostlash sistemaga xos).

Asinxron motorning turg'un ishlash shartlari quyidagilardan iborat:

1. Agar rotorning aylanish chastotasi *n* ning oshishida statik moment M_{st}, momentning aylantiruvchi momenti M ga nisbatan sekin kamaysa, motorning ishi turg'un bo'ladi. Bu shart quyidagi tengsizlik ko'rinishida ifodalanadi:

$$dM / dn < dM_{st} / dn . \qquad (12.20)$$

Bu shart $M_{st} = f(n)$ xarakteristikasi kamayuvchi bo'lgan barcha mexanizmlar uchun bajariladi, demak, sirpanish $0 < s < s_{kr}$ oraliqda o'zgarganda asinxron motor turg'un ishlaydi. Lekin, shuni ta'kidlash lozimki, rotor chulg'amidagi isroflar sirpanishga mutanosib bo'ladi, shu tufayli asinxron motorning iqtisod nuqtayi nazaridan normal ishi sirpanishning kam qiymatlarida bo'lishligidir.

2. Amaliy jihatdan (12.20) shart zaruriy hisoblanib, *lekin yetarli emas*. Asinxron motorni ekspluatatsiya qilish jarayonida qisqa muddatli yuk momentining o'zgarishi faqat kichik bo'lmasdan, uning ish rejimida keskin o'zgaradigan katta qiymatli yuk momenti ham sodir bo'lib turadi. Bunday holda motorning sirpanishi s_{kr} dan kam bo'lib, lekin unga yaqin sirpanishda ishlayotganda tasodifan katta yuk qo'yilsa, unda $M_{st} > M_{em}$ bo'lib uning to'xtashiga olib keladi. Shuning uchun asinxron momentning maksimal momentini ayrim hollarda *barbod qiluvchi* (to'ntaruvchi) moment deyiladi.

Katta ortiqcha yuklanishlarda *motor ishining turg'unligini nominal momentni $M_N < M_{max}$ qilib tanlash bilan ta'minlanadi*. Maksimal momentning karraligi yoki o'ta yuklanish bilan ishlash qobiliyati $k_M = M_{max} / M_N$ standart tomonidan belgilanadi. Umumiy maqsadli asinxron motorlar uchun $k_M = 1{,}7 \div 2{,}5$ oraliqda bo'ladi.

3. *Asinxron motorlarning turg'un ishlashini ta'minlash uchun elektr ta'minotining sifati katta ahamiyatga egadir*. Asinxron motorning aylantiruvchi momenti unga berilayotgan kuchlanishning kvadratiga bog'liq bo'ladi. Shuning uchun, hatto kuchlanishning ozgina kamayishi ham maksimal momentga ta'sir qiladi, kuchlanish nisbatan ko'proq kamayganda (masalan, $U_1 = 0{,}7 \cdot U_N$ bo'lganda) esa motorning nominal yuk bilan ishlashi mumkin bo'lmay qoladi, chunki bu holda aylantiruvchi moment $M \equiv U_1^2 = 0{,}49$, ya'ni elektromagnit moment

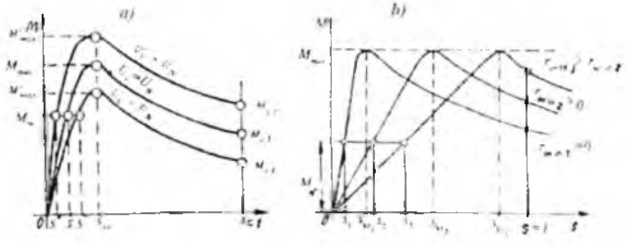
taxminan 2 marta kamayadi va motor nominal yukda ishlashi mumkin bo'lmay qoladi.

12.3. Stator chulg'amiga berilgan kuchlanish $U_1 \neq U_{1N}$ bo'lganda va faza rotorli asinxron motorning rotor chulg'amiga qo'shimcha aktiv qarshiliklar ulangandagi mexanik xarakteristikalar

Stator chulg'amiga berilgan kuchlanish nominaldan farqli bo'lganda mexanik xarakteristika. Asinxron motorlarni ishlatish jarayonida tarmoq kuchlanishi (f_1 = const bo'lganda) nominal kuchlanishga nisbatan o'zgarishi mumkin. Shu sababli kuchlanishning bunday o'zgarishi asinxron motorning mexanik xarakteristikalariga qanday ta'sir etishi *amaliy jihatdan muhim hisoblanadi.* Bunda tormozlovchi moment o'zgarmas va qiymat jihatidan elektromagnit momentga teng $M_t = M$ = const deb hisoblaymiz.

Agarda kuchlanish $U_1 < U_{1N}$ bo'lsa, sirpanish oshadi, moment kuchlanishning kvadrati (U_1^2)ga mutanosib ravishda kamayadi, Natijada motorning o'ta yuklanish qobiliyati kamayib ketadi (12.5,*a*-rasm). Kuchlanish kamayganligi sababli magnit oqim Ф ham kamayadi, natijada rotor tokining aktiv tashkil etuvchisi I_{2a} oshadi. Sirpanish s va rotor chastotasi f_2 oshganligi uchun rotor tokining reaktiv tashkil etuvchisi I_{2r} ham ortadi. Demak, rotor toki kvadratiga mutanosib ravishda rotor chulg'amidagi elektr isroflar ham ortadi. Motor validagi yuk katta bo'lsa, stator toki I_1 ham ortadi, kichik yukda esa u kamayadi. Shu sababli katta yukda stator chulg'amidagi elektr isroflari ortib, motorning FIK va quvvat koeffitsienti cosφ kamayadi. Standart talablariga binoan motorni kuchlanishi nominal kuchlanishga nisbatan 5 % gacha kamayganga qadar ishlatish mumkin.

Agarda kuchlanish $U_1 > U_{1N}$ bo'lsa, *yuqoridagi ketma-ketlik asosida tushuntirish mumkin.* Ammo bunda motorning magnit sistemasi o'ta magnitlangan bo'lsa, magnit oqimining oshishi magnitlanish tokining qiymatini oshirib yuboradi, natijada bu tok stator tokining nominal qiymatidan katta ham bo'lishi mumkin. Bu holda asinxron motorning uzoq muddat ishlashi mumkin bo'lmay qoladi. Standart talablariga binoan asinxron motorni kuchlanishi nominal kuchlanishga nisbatan 10% gacha oshganga qadar ishlatish mumkin. Yuqoridagi ikki hol uchun motorning mexanik xarakteristikasi 12.5-rasmda ko'rsatilgan.



12.5-rasm. *Kuchlanish nominaldan farqli bo'lganda (a)da faol rotorli asinxron motor rotor chulg'ami aktiv qarshiligining har xil qiymatlarida (b) mexanik xarakteristikalar*

Rotor chulg'amiga ulangan qo'shimcha aktiv qarshilik qiymatining mexanik xarakteristikaga ta'siri. Buni faqatgina *faza rotorli asinxron motorda* amalga oshirish mumkin. Qarshilik (tormoz) momenti M_t=const bo'lgandagi faza rotorli asinxron motorning mexanik xarakteristikalariga qo'shimcha qarshiliklarning ta'siri 12.5,*b*-rasmda ko'rsatilgan. Bunda rotor chulg'amidagi elektr isroflari katta bo'lganligi tufayli, motorning FIK nisbatan kichik bo'ladi. Bu esa *uning kamchiligidir*. Ishga tushirish jarayonidagi tokning kamayib, ishga tushirish momentining oshishi esa *faza rotorli asinxron motorning afzalligi* hisoblanadi.

12.4. Magnit maydon yuqori garmonikalarining asinxron motor mexanik xarakteristikasiga ta'siri

Asinxron mashinaning havo oralig'idagi magnit maydoni nosimmetrik bo'ladi, chunki unda magnit maydonning asosiy (birinchi) garmonikasidan tashqari, yana fazoviy va vaqt bo'yicha o'zgaradigan yuqori garmonikalari bo'ladi. Stator va rotorda tishlarning bo'lishi va MYK ning stator va rotor aylanasi bo'ylab nosinusoidal tarqalishi, mashina parametrlarining nochizig'iy bo'lishi va boshqalar fazoviy garmonikalarni keltirib chiqaradi. Vaqt bo'yicha o'zgaradigan yuqori garmonikalar esa kuchlanishning nosimmetrikligi va nosinusoidalligi oqibatida hosil bo'ladi. Ana shu fazoviy va vaqt bo'yicha o'zgaradigan yuqori garmonikalar *qo'shimcha momentlarni* hosil qiladi va mexanik xarakteristikaga *salbiy ta'sir* ko'rsatadi. Bu momentlarga: *asinxron, sinxron, vibratsion va reaktiv* momentlar kiradi.

Quyida *qo'shimcha (asinxron, sinxron va reaktiv)* momentlarga oid umumiy ma'lumot keltiramiz.

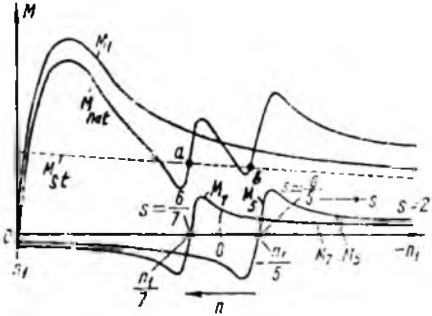
Asinxron momentlar. Stator maydoni v-fazoviy garmonikalarining rotor chulg'amida hosil qilgan toklari bilan ta'siri tufayli vujudga keladi. Bu momentlar motorning xossalarini yomonlashtirgani uchun ularni parazit (keraksiz, ortiqcha) momentlar deyiladi.

12.6-rasmda asinxron motorning soat miliga teskari aylanadigan to'g'ri maydonning 7-garmonikasi va soat mili bo'yicha aylanadigan teskari maydonning 5-garmonikasi hosil qilgan $M_v = f(s)$ asinxron momentlarning grafiklari keltirilgan (bunda s – maydonning asosiy garmonikasiga nisbatan rotor sirpanishi).

5-garmonika hosil qilgan teskari maydon sirpanish $s = 0 \div 1$ oralig'ida teskari moment M_5 ni yaratadi (bu tormoz rejimga xos); 7-garmonika hosil qilgan to'g'ri maydon sirpanish $0{,}857<s<1$ bo'lganda to'g'ri moment M_7 ni yaratadi (bu motor rejimga xos), sirpanish $s < 0{,}857$ bo'lganda esa – teskari moment M_7 ni yaratadi (bu generator rejimga xos). M_5 va M_7 momentlarning ordinatalarini asosiy garmonika ordinatasi bilan qo'shib natijaviy asinxron moment M_{nat} ning o'zgarish chizig'ini olamiz (12.6-rasm):

$$M_{nat} = M_1 + M_5 + M_7 \,. \qquad (12.21)$$

Natijaviy asinxron moment sirpanish $0{,}7< s < 0{,}85$ bo'lganda $M_{nat} < M_{st}$ bo'lib "o'pirilish"(natijaviy momentning keskin kamayishi) hodisasi ro'y berib motorni ishga tushirish jarayonini qiyinlashtiradi va rotor kam aylanish chastotada "tutilib" qolishi mumkin.



12.6-rasm. *Maydonning yuqori (5 va 7) garmonikalari va 1-garmonikasi (asosiy maydon) hosil qilgan asinxron momentlar (M_5, M_7 va M_1) hamda natijaviy asinxron moment (M_{nat}); M_{st} – statik moment.*

Elektromagnit momentning o'zgarish shakliga stator va rotorda tishlarning mavjudligi tufayli vujudga keladigan maydonning tish garmonikalari hosil qilgan asinxron parazit (keraksiz, salbiy ta'sir etuvchi) momentlar sezilarli ta'sir qiladi. Ularning salbiy ta'sirini kuchsizlantirishning samarali usuli – rotor pazlarini bitta tish

bo'linmasiga qiyshaytirib yasashdir (bunga oid batafsil ma'lumot 10.5-bandda berilgan).

Yuqori garmonikalarning motor xossasiga zararli ta'sirini uni loyihalash jarayonida stator Z_1 va rotor Z_2 pazlar sonini to'g'ri tanlash bilan ham kamaytirish mumkin. Bu pazlar nisbati $Z_2 \leq 1{,}25\ (Z_1 \pm p)$ bo'lishi kerak.

Sinxron momentlar. Asinxron mashinalarda maydon yuqori garmonikalaridan birontasining aylanish chastotasi rotor aylanish chastotasi bilan mos tushsa *sinxron moment* paydo bo'ladi. Agar bu moment nisbatan katta bo'lsa asinxron motorni ishga tushirish jarayonida rotor sinxron chastotada aylanayotgan yuqori garmonika maydoni bilan ta'sirlashib aylanish chastotasi nominalga yetmagan chastotada "tutilib" turg'un ishlab qolishi mumkin. Sinxron moment elektromagnit momentning o'zgarish shaklida rotor aylanish chastotasining kichik zonasida chuqur "o'pirilish"lar yaratadi, lekin rotorning kinetik energiyasi tufayli bu to'siqlar yengib o'tiladi.

Stator va rotor tish garmonikalari hosil qilgan sinxron momentlar 1) $Z_1 = Z_2$ va 2) $Z_2 - Z_1 = \pm 2p$ bo'lgan shartlarda eng noqulay (yomon) hisoblanadi. $Z_1 = Z_2$ da bir tomonga aylanadigan garmonikalarning chastotalari mos tushsa, 2-holda esa qarama-qarshi tomonlarga aylanadigan garmonikalarning chastotalari mos tushadi. Birinchi holda rotor qo'zg'almas bo'lib, yukning qarshilik momenti katta, asosiy moment kichik bo'lganda esa motorning rotori aylanmay qoladi.

Reaktiv momentlar. Stator va rotorda tishlarning mavjudligidan har xil magnit o'tkazuvchanlikning hosil bo'lishi tufayli ***reaktiv momentlar*** vujudga keladi. Ferromagnit jism magnit maydonda magnit qarshiligi eng kam bo'lgan holatni egallashga intiladi. Eng katta reaktiv moment $Z_1 = Z_2$ da bo'ladi. Reaktiv moment: chulg'am faqat statorda yoki rotorda bo'lsa; tish garmonikasining qutb bo'linmasi τ_n rotor tish bo'linmasi $t_{z2} = 2\pi R/Z_2$ bilan stator yoki rotor yuzasi silliq bo'lganda mos tushgan hollarda paydo bo'ladi. Reaktiv momentlar zararli ta'sir ko'satishi mumkin, lekin bu momentlardan ijobiy texnik effektlarni olish uchun ham foydalanish mumkin (masalan, reaktiv sinxron mashinalarda).

Nazorat savollari:

1. Asinxron motorda elektromagnit kuch va moment qanday hosil bo'ladi?

2. Asinxron motorning turg'un ishlash shartlari nimalardan iborat?

3. Faza rotorli asinxron motorning afzalligi va kamchiligi nimalardan iborat?

13-BOB. ASINXRON MOTORNING DOIRAVIY DIAGRAMMASI, ISH XARAKTERISTIKALARI VA ULARNI HISOBLASH USULLARI

13.1. Asinxron motor toklarining doiraviy diagrammasini asoslash

Asinxron mashina toklarining doiraviy diagrammasi sirpanishning har qanday qiymatida mashinaning ish rejimini xarakterlaydigan barcha elektromagnit kattaliklarni *bilvosita* (vositali) aniqlashga imkon beradi.

Asinxron motorning aktiv va induktiv qarshiliklari nisbatan o'zgarib turishi mumkin. Bunday motorlar toklarining o'zgarish diagrammasi ancha murakkab xarakterga ega bo'ladi. Lekin asinxron motorning xarakteristikalari to'g'risida dastlabki ma'lumotlarga ega bo'lish uchun toklarning soddalashgan doiraviy diagrammasidan foydalanish amaliy ahamiyatga ega.

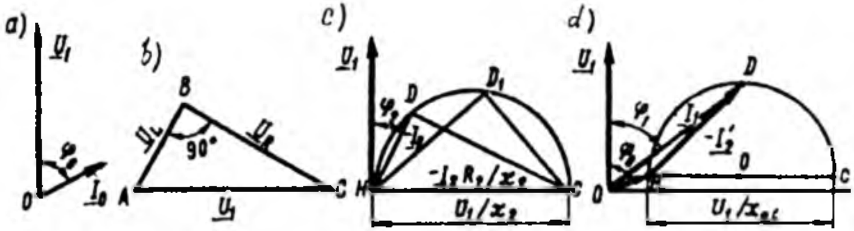
Quyida parametrlari o'zgarmas deb va o'zgaruvchan kattaliklar (kuchlanish, tok, MYK va boshq.)ning o'zgarishi sinusoidal shaklda deb taxmin qilingan asinxron motorning *soddalashgan doiraviy diagrammani* qurish tartibi bilan tanishamiz. Bunday motorlar stator va rotor toklarining o'zgarish diagrammasi aylana shaklda bo'lgani uchun uni ***toklarning doiraviy diagrammasi*** deyiladi.

Mazkur diagramma asinxron motorning soddalashgan G-simon almashtirish sxemasi (11.4-rasm) asosida quriladi. Bu sxemaning magnitlanish shoxobchasi parametrlari o'zgarmasdir. Ishchi shoxobcha $(r_2 + jx_2)$ esa o'zgaruvchan parametr (r_2)ga ega. Bu shoxobcha uchun diagrammani kuchlanishlarning to'g'ri burchakli uchburchagi ABC ko'rinishida tasvirlab berish o'ng'ay hisoblanadi. Bu uchburchakning katetlari: $\overline{AB} = \underline{U}_L = \underline{I}_2 x_2$ va $\overline{BC} = \underline{U}_r = \underline{I}_2 r_2$ – kuchlanish U_1 ning tegishlicha reaktiv va aktiv tashkil etuvchilari; $\overline{AC} = \underline{U}_1 = \underline{U}_r + j\underline{U}_L$ – motorga berilgan kuchlanish (13.1,*b*-rasm). ABC uchburchakning har bitta tomonini x_2 ga bo'lib HDC uchburchagini hosil qilamiz. Bunda $\overline{HD}$ katet $-\underline{I}_2$ tok vektorini tasvirlaydi. Bu vektorga ordinatalar o'qining musbat yo'nalishida $\varphi_2 = \mathrm{arctg}(x_2/r_2)$ burchak ostida $\underline{U}_1$ kuchlanish vektorini qo'yamiz (13.1,*c*-rasm).

Agar aktiv qarshilik r_2 o'zgartirilsa, unda zanjirdagi tok ham o'zgaradi, uchburchakning katetlari yangi holatni ($\overline{HD_1}$ va $\overline{D_1C}$)

egallaydi, lekin uchburchakning $\overline{AC} = U_1 / x_2$ gipotenuzasi o'zgarmay qoladi (13.1,*c*-rasm).

Shunday qilib, elektr zanjiri (ishchi shoxobcha)ning yangi ish rejimi diagrammada D_1 nuqtaning holati bilan aniqlanadi. Agar aktiv qarshilik r_2 ni keng ko'lamda (0 dan ∞ gacha) o'zgartirilsa, unda $-\underline{I}_2$ tok vektori diagrammada har xil holatni egallaydi va U_1 / x_2 diametrli aylanani tasvirlaydi.



13.1-rasm. *Asinxron motorning doiraviy diagrammasini asoslashga doir chizmalar.*

Agar aktiv qarshilik $r_2 = 0$ (sof induktiv yuklama) bo'lsa D nuqta C nuqtaning ustiga tushadi. Aktiv qarshilik $r_2 = \infty$ bo'lganda tok $I_2 = 0$ va shu sababli D nuqta C nuqtaning ustiga tushadi. Agar aktiv qarshilik $0 < r_2 < \infty$ oraliqda bo'lsa $-\underline{I}_2$ tok vektorining uchi HDC aylanada har xil holatni egallaydi. Agar 13.1,*a* va 13.1,*b*-rasmlarda ko'rsatilgan diagrammalar birga qo'shilsa G-simon almashtirish sxemaning (asinxron motorning desa ham bo'ladi) doiraviy diagrammasi hosil bo'ladi (13.1,*d*-rasm). $\underline{I}_0$ va $-\underline{I}_2$ tok vektorlarini qo'shib stator toki $\underline{I}_1$ vektorini olamiz. Bu vektor kuchlanish vektori $\underline{U}_1$ ga nisbatan faza bo'yicha φ_1 burchakka siljigan. Doiraviy diagramma toklari aylanasining diametri $\overline{HC} = (U_1 / x_{qt}) / m_i$, bu yerda m_i – tok masshtabi, A/ mm.

Agar diagrammani qurish motorni hisoblashda amalga oshirilsa, unda zaruriy parametrlar hisoblash jarayonida aniqlanadi. Agarda doiraviy diagrammani tayyor motor uchun qurish kerak bo'lsa, unda diagrammaning dastlabki parametrlarini aniqlash uchun ***salt ishlash va qisqa tutashuv tajribalari*** natijalaridan foydalanish zarur bo'ladi.

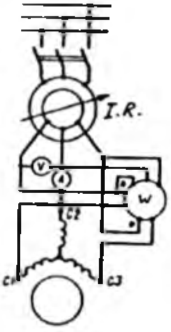
Bu diagrammani salt ishlash va qisqa tutashuv tajribalaridan olingan qiymatlar yordamida qurish eng sodda usul hisoblanadi.

13.2. Asinxron motorning salt ishlash va qisqa tutashuv tajribalari va xarakteristikalari

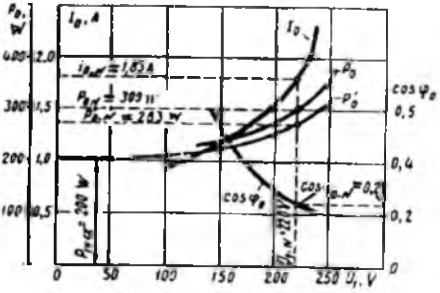
Salt ishlash tajribasi. Asinxron motorning salt ishlash tajribasi 13.2,*a*-rasmdagi sxema bo'yicha o'tkaziladi. Motor valiga yuk ulanmagan holda ishlashida (salt ishlashda) isroflarni qoplash uchun zarur bo'lgan aktiv quvvat P_0, stator toki I_0 va quvvat koeffitsienti $\cos\varphi_0$ larning stator chulg'amiga berilgan kuchlanishga nisbatan o'zgarishiga, ya'ni P_0, I_0, $\cos\varphi_0 = f(U_0)$ bog'lanishga *salt ishlash xarakteristikalari* (13.2,*b*-rasm) deyiladi. Bunda n =const bo'lgani tufayli mexanik isroflari P'_{mex} o'zgarmas bo'ladi. Asinxron motorning *salt ishlash tajribasidan* uning nominal kuchlanishga to'g'ri kelgan quvvat isroflari $P_0 = m \cdot U_0 \cdot I_0 \cdot \cos\varphi_0$ va elektr parametrlari aniqlanadi:

$$\left.\begin{array}{l} Z_0 = U_0 / I_0; \quad r_0 = P_0/(m I_0^2); \quad x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2} \\ \text{yoki} \\ r_0 = Z_0 \cos\varphi_0; \quad x_0 = Z_0 \sin\varphi_0; \quad Z_0 = \sqrt{r_0^2 + x_0^2}. \end{array}\right\} \quad (13.1)$$

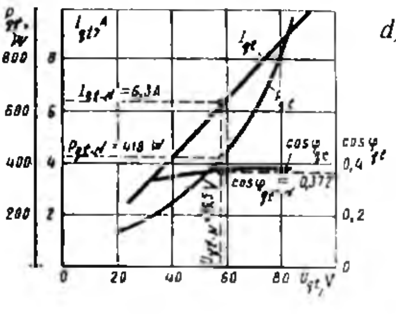
a)



b)



d)



13.2-rasm. *Uch fazali asinxron motor (3 кW, 220/380 V, 1430 ayl / min) ning salt ishlsh va qisqa tutashuv tajribalarini o'tkazish sxemasi* ***(a)****; salt ishlash* ***(b)*** *va qisqa tutashuv* ***(d)*** *xarakteristikalari; I.R. — induksion regulator.*

Asinxron motor stator chulg'amiga berilgan kuchlanish kam bo'lganda mashinaning magnit zanjiri to'yinmaganligi sababli salt ishlash tokining reaktiv tashkil etuvchisi I_{0r}, uning aktiv tashkil etuvchisi I_{0a} ga nisbatan kam bo'ladi. Bunda salt ishlash rejimidagi $\cos\varphi_0$, shu rejim uchun o'zining katta qiymatiga to'g'ri keladi.

Kuchlanishning $U_0 \approx 0{,}5\ U_{1N}$ qiymatlaridan boshlab magnit zanjir to'yina boshlaydi va salt ishlash tokining reaktiv tashkil etuvchisi I_{0r} osha boradi, demak, salt ishlash toki I_0 berilayotgan kuchlanish U_0 ga nisbatan tez o'suvchan bo'ladi. Kuchlanish va tok vektorlari orasidagi faza siljishi (φ_0) oshishi tufayli quvvat koeffitsienti $\cos\varphi_0$ kamaya boradi. Aktiv quvvat P_0 salt ishlash tokining kvadrati (I^2_0)ga mutanosib ravishda o'zgarganligidan, uning o'zgarish shakli taxminan parabola shaklida o'suvchan bo'ladi .

Doiraviy diagramma qurish uchun salt ishlash rejimidan olinadigan nominal kuchlanish (U_{1N})ga to'g'ri kelgan salt ishlash toki I_0 va quvvati P_0 lar o'lchanadi. Bu qiymatlar yordamida quvvat koeffitsienti $\cos\varphi_0$ aniqlanadi va burchak φ_0 hisoblab topiladi.

Qisqa tutashuv tajribasi. Asinxron motorning qisqa tutashuv tajribasi ham 13.2,*a*-rasm bo'yicha o'tkaziladi, lekin bundagi o'lchash asboblarini tanlashda bu rejimdagi tok, kuchlanish va quvvatning o'zgarish qiymatini hisobga olish zarur bo'ladi va *rotor qo'zg'almas holatda bo'lishi shart*. Bu tajribani o'quv maqsadlarida o'tkazishda (chulg'am qizib ketmasligi uchun) pasaytirilgan kuchlanishda dastlabki nuqtani tokning qiymati $I_{qt} = 1{,}2I_{1N}$ da, 2-nuqtani nominal tok ($I_{qt}=I_{1N}$) da va keyingilarini esa undan kamaytirib qisqa tutashuv toki I_{qt}, qisqa tutashuv kuchlanishi U_{qt}, qisqa tutashuvdagi isroflarni qoplaydigan aktiv quvvat P_{qt} o'lchab olinadi. Ular yordamida $I_{qt\,N} = I_{qt}(U_{1N}\ /\ U_{qt})$, $\cos\varphi_{qt}$, $r_{qt} = r_1 + r'_2$ va $x_{qt} = x_1 + x'_2$ qarshiliklar hisoblab topiladi.

Doiraviy diagramma qurish uchun qisqa tutashuv rejimidan olinadigan nominal tok (I_{1N})ga to'g'ri kelgan qisqa tutashuv kuchlanishi U_{qt}, toki I_{qt} va quvvati P_{qt} o'lchanadi. Bu qiymatlar yordamida quvvat koeffitsienti $\cos\varphi_{qt} = P_{qt}/(m_1 U_{qt} I_{qt})$ aniqlanadi va u orqali burchak φ_{qt} hisoblab topiladi. Bu tajribaga oid elektr parametrlar quyidagi formulalar bo'yicha hisoblanadi:

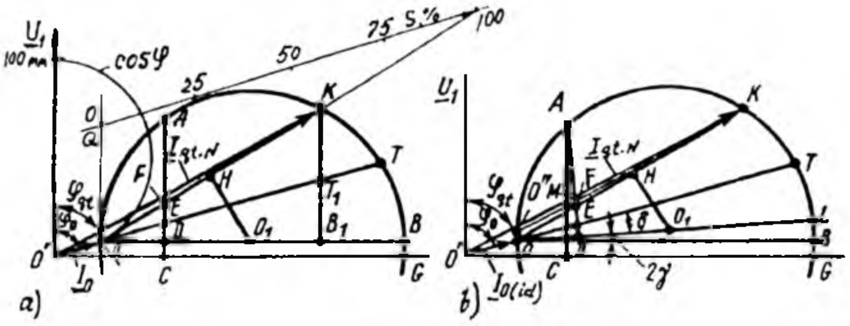
$$Z_{qt} = U_{qt} / I_{qt}; \quad r_{qt} = P_{qt} / (m_1 I_{qt}^2); \quad x_{qt} = \sqrt{Z_{qt}^2 - r_{qt}^2}$$

yoki

$$r_{qt} = Z_{qt} \cos\varphi_{qt}; \quad x_{qt} = Z_{qt} \sin\varphi_{qt}; \quad Z_{qt} = \sqrt{r_{qt}^2 + x_{qt}^2}. \qquad (13.2)$$

13.3. Doiraviy diagrammani salt ishlash va qisqa tutashuv tajribalaridan olingan ma'lumotlar bo'yicha qurish

Soddalashgan doiraviy diagrammani qurish quyidagicha amalga oshiriadi (13.3,*a*-rasm). Koordinata o'qlari o'tkaziladi va ordinatalar o'qida kuchlanish vektori $\underline{U}_1$ qo'yiladi. Toklar uchun masshtab m_i (A/mm) tanlanadi va $\underline{U}_1$ ga φ_0 burchak ostida tok vektori $\underline{I}_0$ ni qo'yib "0" nuqtani, φ_{qt} burchak ostida esa tok $\underline{I}_{qt.N}$ vektorini yo'naltirib "K" nuqta topiladi (bunda salt ishlash tajribasidagi tok $\underline{I}_0$ va burchak φ_0 ideal salt ishlashga mos deb qabul qilinadi). "0" nuqtadan absissalar o'qiga parallel bo'lgan OB chiziqni o'tkazamiz.



13.3-rasm. *Asinxron motorninig soddalashgan (**a**) va aniqlashtirilgan (**b**) doiraviy diagrammalarini salt ishlash va qisqa tutashuv tajribalari ma'lumotlari bo'yicha qurish;* $I_{0(id)}$ *–ideal salt ishlash toki*

So'ngra bu nuqtalarni birlashtirib, uning o'rtasidan OB chiziq tomon $H0_1$ perpendikular o'tkazamiz va toklar aylanasining markazi 0_1 ni topamiz, ya'ni 00_1 yoki 0_1B chiziqlar doiraviy diagrammaning radiusini beradi. «K» nuqtadan OB chiziqqa perpendikular bo'lgan $\overline{KB_1}$ chiziqni tushiramiz va bu kesmani $\overline{KT_1}/\overline{T_1B_1} = r'_2/r_1$ nisbatda bo'lib, "T_1" nuqtani topamiz. Bunda stator chulg'ami qarshiligi r_1 tajriba vaqtida o'lchanadi, r'_2 esa $r'_2 = r_{qt} - r_1$ ayirmadan aniqlanadi). So'ngra "0"nuqtadan "T_1" nuqta orqali o'tadigan chiziqni davom ettirib aylanada "T" nuqtani topamiz. «OT» chiziq *elektromagnit quvvat (yoki momentlar) chizig'i* hisoblanadi.

Doiraviy diagrammada sirpanish liniyasi (shkalasi)ni qurish uchun toklar aylanasiga (0 nuqtada) ordinatalar o'qiga parallel qilib urinma o'tkaziladi. So'ngra ixtiyoriy balandlikdan elektromagnit quvvat chizig'i OT ga parallel qilib foydali quvvat chizig'ining davomi bilan kesishguncha QC to'g'ri chiziq o'tkaziladi. Motorning A nuqtadagi rejimidagi sirpanish s_A ni topish uchun 0 ni A nuqta bilan birlashtirib uni sirpanish shkalasi bilan kesishguncha davom qildiriladi (diagrammada bu chiziq ko'rsatilmagan).

Doiraviy diagrammada quvvat koeffitsienti shkalasini qurish uchun ordinatalar o'qida ixtiyoriy diametrda (100 mm bo'lgani o'lchash uchun qulay) yarim aylana chiziladi. U holda toklar aylanasidagi A nuqtadagi rejim uchun $\cos\varphi_A$ quyidagicha topiladi, ya'ni 0' ni A nuqta bilan birlashtirilgan to'g'ri chiziqning sosφ shkalasi bilan kesishgan nuqtasini birorta harf ("h") bilan belgilansa (diagrammada bular ko'rsatilmagan), unda $\cos\varphi_A$ = 0'h / 100.

Doiraviy diagrammada foydali ish koeffitsienti shkalasini qurib undan FIK ni aniqlashda motordagi qo'shimcha isroflar hisobga olinmagani tufayli katta xatolik kelib chiqadi. Odatda motorning FIK isroflar yig'indisi $\Sigma P'$ ni hisoblash orqali aniqlanadi (buni standart tavsiya qilgan).

Asinxron mashinaning soddalashgan doiraviy diagrammasidan aniqlangan rejim parametrlarining aniqlik darajasi nominal tokkacha qoniqarli bo'ladi, chunki bu oraliqda mashinaning aktiv va induktiv qarshiliklari kam o'zgaradi. Demak, soddalashgan doiraviy diagrammani katta va o'rta quvvatli asinxron mashinalarga qo'llash maqsadga muvofiq ekan.

Agar aniq natijalar olish zarur bo'lsa (kam quvvatli va ayniqsa asinxron mikromashinalar uchun) *aniqlashtirilgan doiraviy diagrammani* (13.3,*a*-rasm) ideal salt ishlash ma'lumotlari bo'yicha hamda almashtirish sxemadagi kompleks son "s_1" ni ham hisobga olgan holda qurishni *standart tavsiya* qiladi. Buning uchun 13.3,*a*-rasmda qurilgan soddalashgan doiraviy diagramma biroz o'zgartiriladi, chunki tajribada o'lchab olingan salt ishlash toki I_0 va hisoblangan burchak φ_0 real holatdagi salt ishlash rejimiga mos keladi (13.3,*a*-rasmda, 0'). Bundan ideal salt ishlash toki $I_{0(id)}$ ni topish uchun calt ishlash isroflari (P'_0)dan stator chulg'amidagi elektr isroflari ($P'_{el(0)}=m_1 I^2_0 r_1$)ni va motordagi mexanik isroflarni ayirgandan [ya'ni $P'_0 - (P'_{el(0)} + +P'_{mex})$] quvvat masshtabi m_p da hosil bo'lgan natijani 0' nuqtadan absissalar o'qiga perpendikular yo'nalishda qo'yib "0" nuqta topiladi. Bu nuqtani 0'

nuqta bilan birlashtirib $\underline{I}_{0(id)}$ vektori aniqlanadi. $\underline{I}_{q1}$ vektori 13.3,*a*-rasmdagidek quriladi. Toklar aylanasining markazini topishda, endi $N0_1$ perpendikularning 13.3,*a*-rasmdagidek 0B chizig'i bilan kesishgan nuqtasi emas, balki toklar aylanasi diametri 0L chizig'i bilan kesishgan nuqtasi bo'ladi. 0L chizig'i 0B gorizontal chizig'ining 0 nuqtasidan soat milining harakatiga teskari yo'nalishda 2γ burchak ostida o'tkaziladi (bunda $\sin 2\gamma \approx 2I_{0(id)}r_1/U_1$). Burchak gg kompleks son "$\underline{s}_1$" ning argumentidir, ya'ni $c_1 = c_1e^{-j\gamma}$ va fizik jihatdan kuchlanish $\underline{U}_1$ va EYK $\underline{E}_1$ vektorlari orasidagi siljish burchagini ifodalaydi.

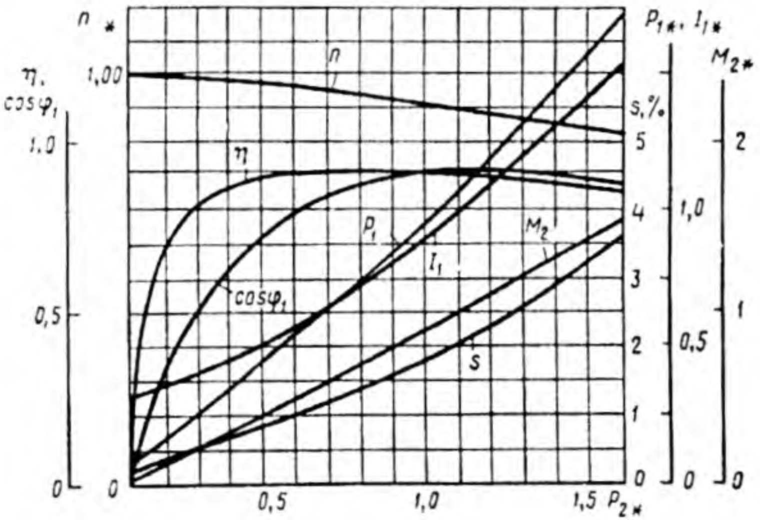
Toklar aylanasida sirpanish $s = \pm\infty$ ga to'g'ri kelgan "T" nuqta "0" nuqtadan 0L chizig'iga dd burchak ostida soat milining harakatiga teskari yo'nalishda o'tkazilgan OT chizig'ining toklar aylanasi bilan kesishishidan hosil bo'ladi ($tg\delta = D\cdot r_1/U_1$, bunda $D = m_I\overline{OL}$ – toklar aylanasining amperlarda qo'yilgan diametri).

Doiraviy diagrammadan biror rejim (masalan, A nuqtasi)ning *energetik muvozanati uchun ma'lumotlar quyidagicha aniqlanadi.* Diagrammada asinxron motorga berilgan *aktiv quvvat* $P_1 - \overline{AC}$ kesma (berilgan quvvat liniyasi 0'G ga tushirilgan perpendikular); *elektromagnit quvvat* P_{em} (momentlar masshtabi m_M da – *elektromagnit moment*) – aylana diametri 0L ga o'tkazilgan perpendikularning elektromagnit quvvat chizig'i 0T (elektromagnit momenti liniyasi) bilan kesishgan nuqtasigacha bo'lgan $\overline{AE}$ kesma; *mexanik quvvat* P_{mex} – 0L chizig'iga perpendikular yo'nalishda o'tkazilgan mexanik quvvati liniyasi 0K gacha bo'lgan $\overline{AF}$ kesma; *foydali quvvat* P_2 – 0L chizig'iga perpendikular yo'nalishda o'tkazilgan foydali quvvati liniyasi 0'K gacha bo'lgan $\overline{AM}$ kesma.

Avtomatika sistemalarida ishlatiladigan asinxron ijrochi motorlar uchun odatda doiraviy diagrammalardan foydalanilmaydi.

13.4. Asinxron motorning ish xarakteristikalari

U_1 = const va f_1 = const shartlar ta'minlangan holda rotorning aylanish chastotasi *n*, sirpanishi s, stator toki I_1; foydali momenti M_2, quvvat koeffitsienti cosφ va FIK η larni valdagi yuk (foydali quvvat) P_2 ni o'zgartirib olingan *n*, s, I_1, M_2, cosφ, η = *f* (P_2) bog'liqlikka asinxron motorning *ish xarakteristikalari* deyiladi (13.4-rasm).



13.4-rasm. *Quvvati 50 kW, 220/380 V, 1470 ayl./min bolgan qisqa tutashgan rotorli asinxron motorning ish xarakteristikalari.*

Motorning validagi yuk oshishi bilan sirpanish s o'sib boradi. Nominal yuklamada sirpanish s_N = 1,5÷5% ni tashkil qiladi. Rotorning aylanish chastotasi (11.1.*a*) dan quyidagiga teng bo'ladi:

$$n = n_1 \cdot (1 - s) = 60 f_1 \cdot (1 - s) / p. \qquad (13.3)$$

Yuklama oshishi bilan sirpanish *s* ortadi, natijada rotorning aylanish chastotasi *n* biroz kamayadi. Asinxron motorning nominal yuk bilan ishlagandagi foydali momenti:

$$M_{2N} = 9{,}55 \cdot P_{2N} / n_N, \quad [\,N \cdot m\,]. \qquad (13.4)$$

Agarda n = const bo'lganda $M_2 = f(P_2)$ bog'lanishning grafigi deyarli to'g'ri chiziq bo'lardi. Lekin yuklama ortishi bilan *n* biroz kamayadi, shu sababli yuklamaning ortishi bilan moment M_2 foydali quvvat P_2 ga qaraganda tezroq o'sadi va uning o'zgarishi yuqoriga og'gan egri chiziqdan iborat bo'ladi.

Motorning validagi yuk oshishi bilan stator toki I_1 ning aktiv tashkil etuvchisi oshib boradi. Kuchlanish U_1 = const bo'lganligidan tok I_1 ning reaktiv tashkil etuvchisi I_{1r} esa bir xilda qoladi. Shuning uchun ham turli yuklamalarda motorning magnit oqimi deyarli o'zgarmaydi. Shu sababli $I_1 = f(P_2)$ bog'lanish deyarli bir xilda qoladi.

Motor kichik yuk bilan ishlaganda stator toki tarkibidagi reaktiv tok, aktiv tashkil etuvchisiga nisbatan katta bo'ladi. Shu sababli motorning quvvat koeffitsienti kichik (0,1÷0,2) bo'ladi. Yuklamaning ortishi bilan tokning aktiv tashkil etuvchisi orta boradi. Bunda kuchlanish U_1 va motor toki I_1 vektorlari orasidagi burchak kichiklashib, cosφ esa o'sib boradi. Motorning validagi yuk nominal qiymatga yaqinlashganda $\cos\varphi_1$ katta qiymatga erishadi ($\cos\varphi_1$= 0,8÷0,85). Yuklamaning yanada ortishi natijasida rotorning aylanish chastotasi *n* kamayadi, sirpanish s va rotorning induktiv qarshiligi x_2 lar ortishi tufayli $\cos\varphi_1$ biroz kamayadi.

FIK ning o'zgarishi xuddi boshqa elektr mashinalariniki yoki transformatorniki singari bo'ladi. Salt ishlashda FIK η = 0. Yuklamaning ortishi bilan η oshib boradi va *o'zgarmas isroflar* (yuklamaga bog'liq bo'lmagan mexanik va salt ishlash isroflari) *o'zgaruvchan isroflarga* (yuklamaga bog'liq ravishda o'zgaradigan chulg'amlardagi *elektr* va qo'shimcha isroflar) teng bo'lganda o'zining katta qiymatiga erishadi va yuklamaning yanada ortishi natijasida o'zgaruvchan isroflarning oshishi tufayli FIK η biroz kamayadi.

13.5. Asinxron motorlarning ish xarakteristikalarini analitik hisoblash usuli

Asinxron motorlarning ish xarakteristikalarini ularning o'zgarmas elektr parametrlari uchun qurilgan toklarning doiraviy diagrammasini qo'llab hisoblash usuli katta kamchilikka ega, masalan, o'rta va katta quvvatli asinxron motorlarning ish rejimlari o'zgarganda paz va differensial tarqoq magnit oqimlari tomonidan po'lat o'zakning chulg'am joylashgan qismidagi tishlarning to'yinishi tufayli mashina stator va rotor chulg'amlarining induktiv qarshiliklari o'zgaradi.

Chulg'amlardagi tokning oshishi bilan tarqoq oqimlar ham osha boradi va natijada magnit o'zakning tish qismi to'yina boshlaydi. Bunday holda tarqoq oqim uchun magnit o'tkazuvchanlik kamayib, x_1 va x_2 induktiv qarshiliklar ham kamayadi. Motorning ish rejimi nominaldan uning rotori to'xtagunga (s = 1) qadar o'zgarganda uning induktiv qarshiliklari pazlarning shakliga bog'liq holda 1,1÷1,4 marta kamayadi. Sirpanishning oshishi rotor chulg'ami o'tkazgichlarida tokning siqib chiqarish effektining ta'siri tufayli r_2' aktiv qarshiligining ham oshishiga olib keladi.

Demak, toklarning doiraviy diagrammasi bo'yicha aniqlangan ish xarakteristikalarining yetarli darajada aniqligi sirpanishning juda ham kam qiymatlariga to'g'ri kelar ekan.

Asinxron motorning katta sirpanishlarga to'g'ri keladigan ishini xarakterlovchi kattaliklar, shu jumladan, ishga tushirish toki va ishga tushirish momentini aniqlashda *katta xatoliklarga* olib keladi. Doiraviy diagrammada qo'shimcha grafik qurishlar va ulardan foydalanib kesmalarni o'lchashlarda ham *xatoliklar* kelib chiqadi.

Asinxron motorning ish xarakteristikalarini *analitik usulda* hisoblaganda yuqorida ko'rsatilgan kamchiliklar bo'lmay, zamonaviy hisoblash texnikasida amalga oshirilishi tufayli aniqlik yuqori darajada bo'ladi.

Analitik hisoblash usul asinxron motorning almashtirish sxemasiga (11.4,*b*-rasm) asoslangan. Bunda asinxron motorning pasportida ko'rsatilgan ma'lumotlar (P_N, U_{1N}, n_N) hamda salt ishlash va qisqa tutashuv tajribalaridan olingan natijalar hisoblashda dastlabki ma'lumot uchun yetarli bo'ladi.

Hisob quyidagi tartibda amalga oshiriladi:

Rotor chulg'amining keltirilgan aktiv qarshiligi r_2', kritik sirpanish s_{kr} va nominal sirpanish s_N lar quyidagicha aniqlanadi:

$$r_2' = r_{qt} - r_1 , \qquad (13.5)$$

$$s_{kr} \approx r_2' \approx / \, x_{qt} . \qquad (13.6)$$

$$s_N = (n_1 - n_N)/n_1 . \qquad (13.7)$$

Sirpanishga 7÷8 qiymatlar (bunga sirpanishning nominal s_N va kritik s_{kr} qiymatlari ham kiradi) berib ish xarakteristikalarini qurish uchun zaruriy bo'lgan kattaliklar aniqlanadi.

Ekvivalent aktiv qarshilik, (Ω)

$$r_{ek} = r_1 + r_2' / s. \qquad (13.8)$$

Almashtirish sxemaning ishchi zanjiri (konturi)ning ekvivalent to'la qarshiligi (Ω)

$$Z_{ek} = \sqrt{r_{ek}^{\;2} + x_{qt}^{\;2}} . \qquad (13.9)$$

Asinxron motor almashtirish sxemasi ish konturiining quvvat koeffitsienti

$$\cos\varphi_2 = r_{ek} / Z_{ek} . \qquad (13.10)$$

Rotor chulg'amining keltirilgan toki, (A)

$$I'_2 = U_1 / Z_{ek} \qquad (13.11)$$

va uning aktiv va reaktiv tashkil etuvchilari, (A)

$$I'_{2a} = I'_2 \cos\varphi_2 ; \qquad (13.12)$$

$$I'_{2r} = I'_2 \sin\varphi_2 . \qquad (13.13)$$

Stator chulg'amining aktiv va reaktiv tashkil etuvchilari, (A)

$$I_{1a} = I_{0a} + I'_{2a} ; \qquad (13.14)$$

$$I_{1r} = I_{0r} + I'_{2r} , \qquad (13.15)$$

bularda: $I_{0a} = I_0 \cos\varphi_0$ – salt ishlash tokining aktiv tashkil etuvchisi;

$I_{0r} = I_0 \sin\varphi_0$ – salt ishlash tokining reaktiv tashkil etuvchisi.

Stator chulg'amining toki, (A)

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2} . \qquad (13.16)$$

Asinxron motorning quvvat koeffitsienti

$$\cos\varphi_1 = I_{1a} / I_1 . \qquad (13.17)$$

Motorning iste'mol qiladigan aktiv quvvati, (W)

$$P_1 = m_1 U_1 I_{1a} . \qquad (13.18)$$

Salt ishlash rejimdagi aktiv quvvati, (W)

$$P_0 = m_1 I_0^2 r_1 + P'_m + P'_{mex} , \qquad (13.19)$$

bunda r_1 - stator fazaviy chulg'amining aktiv qarshiligi (Ω); bu qarshilik mazkur tajribani o'tkazib bo'lgandan keyin tezda o'lchab olinadi.

Stator chulg'amidagi elektr isroflar, (W)

$$P'_{e1} = m_1 I_1^2 r_1 . \qquad (13.20)$$

Asinxron motorning elektromagnit quvvati, (W)

$$P_{em} = P_1 - (P'_m + P'_{e1}). \qquad (13.21)$$

Rotor chulg'amidagi elektr isroflar, (W)

$$P'_2 = m_2 I_2^2 r_2 = m_1 \left(I'_2\right)^2 r'_2 . \qquad (13.22)$$

Elektromagnit moment, (N·m)

$$M = P_{em} \omega_1 ,\qquad (13.23)$$

bunda $\omega_1 = 2\pi n_1 / 60 = 2\pi f_1 / p$ — maydonning burchak tezligi.

Qo'shimcha isroflar (nominal rejim uchun), (W)

$$P'_{qo'sh(N)} = 0{,}005\ P_1 .\qquad (13.24)$$

Motorning nominal bo'lmagan rejimi uchun qo'shimcha isroflarini hisoblashda quyidagi ifodadan foydalanish zarur:

$$P'_{qo'sh} = P'_{qo'sh(N)} \cdot k^2_{yu} .\qquad (13.25)$$

bu yerda $k_{yu} = I_1 / I_{1N}$ — yuklama koeffitsienti.

Asinxron motorda barcha isroflarning yig'indisi:

$$\Sigma P' = P'_m + P'_{e1} + P'_{e2} + P'_{mex} + P'_{qo'sh} .\qquad (13.26)$$

Asinxron motorning foydali quvvati, (W)

$$P_2 = P_1 - \Sigma P' \text{ yoki } P_2 = P_{em} - P'_{e2} - P'_{mex} - P'_{qo'sh}\qquad (13.27)$$

bunda P'_{mex} — mexanik isroflar (ular salt ishlash tajribasidan aniqlanadi).

Motorning FIK

$$\eta = P_2 / P_1 = 1 - \Sigma P' / P_1 .\qquad (13.28)$$

Rotorning aylanish chastotasi (13.3) formula bo'yicha hisoblanadi.

Motorning foydali momenti (N·m)

$$M_2 = 9{,}55 \cdot P_2 / n.\qquad (13.29)$$

Sirpanishning bir necha me'yoriy qiymatlari uchun hisoblangan natijalar jadvalga yig'iladi va motorning ish xarakteristikalari — n, M_2, I_1,

$\cos\varphi_1$, $\eta = f(P_2)$ kuchlanish $U_1 = U_N$ = const va chastota f_1=const uchun quriladi.

Nazorat savollari:

1. Asinxron motorning salt ishlash xarakteristikasini o'tkazishdan maqsad nima?

2. Asinxron motorning qisqa tutashuv xarakteristikasini o'tkazishdan maqsad nima?

3. Motorning ish xarakteristikasi deb qanday bog'lanishga aytiladi?

4. Asinxron motor toklarining doiraviy diagrammasi to'g'risida ma'lumot bering.

5. Motorning mexanik xarakteristikasi deb qanday bog'lanishga aytiladi?

14-BOB. ASINXRON MOTORLARNI ISHGA TUSHIRISH VA AYLANISH CHASTOTASINI ROSTLASH

14.1. Uch fazali asinxron motorlarni ishga tushirish

Asinxron motor ishga tushirilganda, quyidagi *asosiy talablar* bajarilishi lozim:

Motorni ishga tushirish mumkin qadar oson va qo'shimcha qurilmalarsiz bajarilishi lozim, ishga tushirish momenti yetarli darajada katta, ishga tushirish toki esa mumkin qadar kichik bo'lishi lozim.

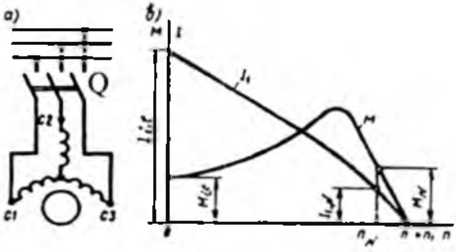
Uch fazali asinxron motorlarni ishga tushirishda amalda *quyidagi usullar* qo'llaniladi. Stator chulg'amlarini to'g'ridan to'g'ri tarmoqqa ulash, stator chulg'amiga pasaytirilgan kuchlanish berib va rotor chulg'amiga reostatni ulab ishga tushirish (oxirgisi faza rotorli motorlarda).

To'g'ridan to'g'ri tarmoqqa ulab ishga tushirish. Kichik va o'rta quvvatli qisqa tutashgan rotorli asinxron motorlar ana shunday usul bilan ishga tushiriladi. Bunda motorning stator chulg'ami yetarli darajadagi quvvatga ega bo'lgan elektr tarmog'iga magnit ishga tushirgich yoki oddiy ulagich yordamida qo'shiladi va uning tezligi tabiiy mexanik xarakteristikasi bo'yicha o'sib boradi. Ishga tushirish momenti $M_{i.t}$ quyidagicha topiladi (ishga tushirish paytida s = 1 bo'ladi):

$$M_{i.t} = (m_1 \; U_1^2 \cdot r'_2)/\; \{\omega_1[(r_1 + r'_2)^2 + (x_1 + x'_2)^2]\}. \quad (14.1)$$

Ishga tushirish toki $I_{i.t}$ ancha katta bo'lsa ham motor uchun xavfli bo'lmaydi, chunki ishga tushirish qisqa vaqt ichida kechadi.

Ishga tushirish tokining nominal tokdan 5÷7 marta katta bo'lishi va ishga tushirish momentining uncha katta bo'lmasligi bu usulning kamchiligi hisoblanadi.



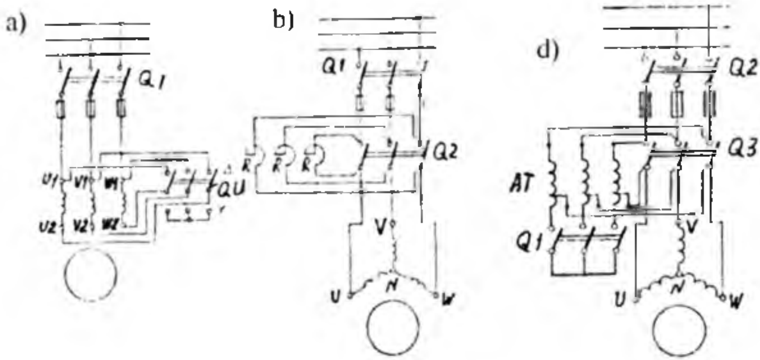
14.1-rasm. *Qisqa tutashgan rotorli asinxron motorni to'g'ridan to'g'ri tarmoqqa ulab ishga tushirish sxemasi* ***(a)*** *va bunda tok I_1 va aylantiruvchi moment M ning o'zgarish grafiklari* ***(b)***.

Motorning stator chulg'amini to'g'ridan to'g'ri elektr tarmog'iga ulab ishga tushirish yuqoridagi kamchiliklarga ega bo'lishidan qat'iy nazar, u sodda, arzon va energetik ko'rsatkichlari (η, $\cos\varphi_1$) kattadir.

Tarmoq kuchlanishini pasaytirib ishga tushirish. Bunday usul bilan quvvati katta bo'lgan qisqa tutashgan rotorli asinxron motorlar ishga tushiriladi. Tarmoq kuchlanishini pasaytirish usullari quyidagidan iborat:

a) stator chulg'amini yulduz usulidan uchburchak usuliga o'tkazish yo'li bilan ishga tushirish. Asinxron motorni bunda stator chulg'ami fazalariga berilayotgan kuchlanish $\sqrt{3}$ marta kamayadi, xuddi shuningdek faza toklari ham $\sqrt{3}$ marta kamayadi. Liniya toklari esa 3 marta kamayadi. Stator chulg'amlarining ulanish sxemasini o'zgartirish 3 fazali kontaktor yoki ulagich yordamida amalga oshiriladi (14.2,*a*-rasm).

b) asinxron motorni reaktor yordamida ishga tushirish. Bunday usul bilan ishga tushirishda (14.2,b-rasm) reaktiv qarshiliklarda ishga tushirish tokiga to'g'ri mutanosiblikda bo'ladigan kuchlanish pasayishi ΔU vujudga kelib, stator chulg'amlariga pasaygan kuchlanish U_{1ras} beriladi.



14.2-rasm. *Tormoz kuchlanishini pasaytirib ishga tushirish sxemalari: stator chulg'amini yulduz ulanish sxemadan uchburchak ulanish sxemaga Yo'li bilan ishga tushirish (**a**); stator chulg'amiga reaktor R (reaktiv qarshilik) ulab (**b**) yoki **AT** – avtotransformator yordamida kuchlanishni pasaytirib (**d**) ishga tushirish sxemalari (bularda: QU – qayta ulagich; **Q1, Q2 va Q3** – ishga tushirish kontaktorlari).*

Bu kuchlanishning qiymati quyidagicha topiladi:

$$\underline{U}_{1tras} = \underline{U}_1 - j\, I_1 x_r\,, \qquad (14.2)$$

bunda x_r — ishga tushirish reaktiv qarshiligi.

Bu kuchlanish ta'sirida motorning rotori aylana boshlaydi. Motorning aylanish chastotasi oshib borgan sari rotor chulg'amida hosil bo'ladigan EYK E_{2s} kamayib boradi, natijada ishga tushirish toki ham kamayadi.

Stator chulg'amlari bilan ketma-ket ulangan qarshiliklarda kuchlanish pasayishi ΔU kamayadi va motorning aylanish chastotasi oshgan sari unga berilayotgan kuchlanish U_1 avtomatik ravishda ko'payib boradi. So'ngra Q2 ulagich ulanadi va motorga tarmoq kuchlanishi U_1 beriladi, bunda motor nominal kuchlanish bilan ishlaydi.

d) asinxron motorni avtotransformator yordamida ishga tushirish (14.2,b-rasm). Dastlab Q3 ulagichning ulangan holatida Q1 ulagich qo'shiladi. Bunda motorning stator chulg'amiga avtotransformatordan pasaytirilgan kuchlanish (U_{1pas}) beriladi.

Bunda motorning dastlabki $M_{i.t}$ momenti quyidagicha topiladi:

$$M_{i.t} = M_{i.t.N_s}\left(U_1 / U_{1N}\right)^2. \qquad (14.3)$$

Ishga tushirish toki kamayadi va u quyidagi formula bo'yicha aniqlanadi

$$I_{i.t} = I_{i.t.N_s}\left(U_1 / U_{1N}\right)^2. \qquad (14.4)$$

Rotorning aylanish chastotasi oshgandan keyin Q3 ulagich uziladi va Q2 ulagich ulanadi. Shu tariqa stator chulg'amiga tarmoqning to'la kuchlanishi beriladi. Demak, avtotransformator yordamida tarmoqning kuchlanishi (0,55÷ ÷0,73) U_{1N} gacha pasaytirilar ekan. Tarmoq kuchlanishini pasaytirib asinxron motorlarini ishga tushirishning yuqorida ko'rib o'tilgan usullarida ishga tushirish toki va momentining kichikligi *ularning kamchiligidir*.

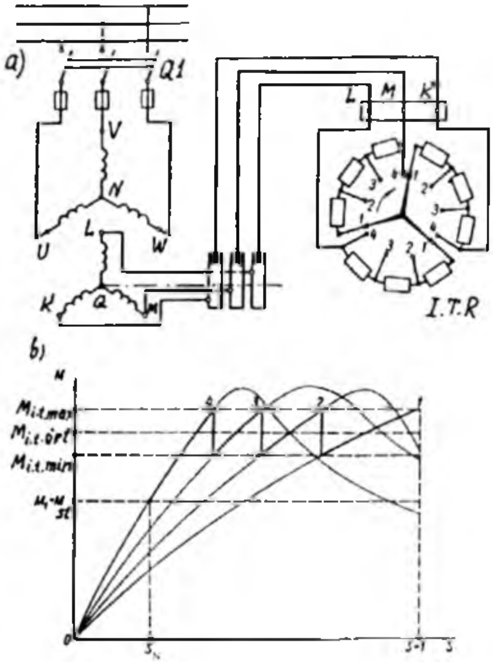
Faza rotorli asinxron motorlarni ishga tushirish. Faza rotorli asinxron motorlar maxsus uch fazali ishga tushirish reostati yordamida ishga tushiriladi. Ishga tushirish toki quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$I_{i.t} = U_1 / \sqrt{\left(r'_{i.t} + r'_2 + r_1\right)^2 + \left(x_1 + x'_2\right)^2}\,. \qquad (14.5)$$

Ishga tushirish reostati rotor chulg'amiga ketma-ket ulanadi (14.3-rasm).

Uning yordamida rotor chulg'amining aktiv qarshiligi oshirilib, ishga tushirish toki kamaytiriladi, momenti esa oshiriladi.

Dastlab motor 1-xarakteristika bo'yicha ishga tushiriladi. Bu holda ishga tushirish reostatining qarshiligi $r_{i.t} = r_1 + r_2 + r_3$ bo'lib, aylantiruvchi moment maksimal momentga teng bo'ladi ($M=M_{max}$).



14.3-rasm. *Faza rotorli asinxron motorni ishga tushirish sxemasi (**a**) va ishga tushirish momenti grafigini qurish (**b**); **ITR** – ishga tushirish reostati. (Izoh: chulg'am uchlari yangi standart bo'yicha belgilangan.)*

Motorning aylanish chastotasi oshib borgan sari aylantiruvchi moment M ham kamaya boradi va $M_{i.t.min}$ momentdan kichik ($M< M_{i.t.min}$) bo'ladi. $M=M_{i.t.min}$ bo'lganda ishga tushirish reostatining bir qismi (r_1) sxemadan chiqariladi. Bunda aylantiruvchi moment birdaniga $M_{i.t.max}$ qiymatga erishadi, so'ngra aylanish chastotasining oshishi bilan 2-xarakteristika bo'yicha o'zgaradi. Bu holda ishga tushirish reostatining qarshiligi $r_{i.t.2} = r_2 + r_3$ bo'ladi.

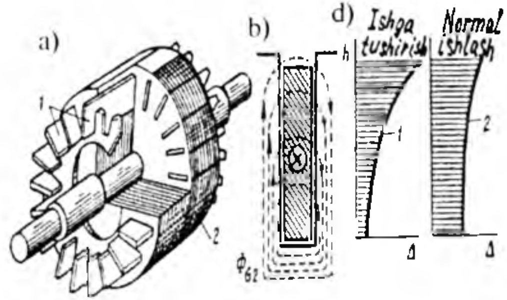
Aylantiruvchi moment $M_{i.t.min}$ gacha kamayib boradi, shu vaqtda r_2 qarshilikni uzadilar, bunda motor 3-xarakteristika bo'yicha ishlaydi. Bunda ishga tushirish reostatining qarshiligi $r_{i.t.3} = r_3$ bo'ladi. Ishga tushirishning oxirida ishga tushirish reostati sxemadan butunlay

chiqariladi va shu bilan rotorning chulg'amlari qisqa tutashtiriladi. Bu holda motor tabiiy xarakteristika (4) bo'yicha ishlaydi (14.3,*b*-rasm).

Faza rotorli motorlarni ishga tushirish va ular tuzilishining murakkabligi, qimmatligi va boshqalar bunday motorlarning kamchiligi hisoblanadi. Shu sababli faza rotorli motorlar asosan ishga tushirish sharoiti og'ir bo'lgan mexanizmlarda qo'llaniladi.

14.2. Ishga tushirish xossalari yaxshilangan uch fazali qisqa tutashgan rotorli asinxron motorlar

Qisqa tutashgan rotorli asinxron motorlarning ishga tushirish momentini, rotor chulg'ami aktiv qarshiligini oshirmasdan kattalashtirish bunday motorlarning maxsus konstruksiyali qilib yaratishga olib keladi. Bunday motorlarga *ishga tushirish momenti kattalashtirilgan* motorlar deyiladi. Bu motorlar jumlasiga *rotori qo'sh katakli va chuqur pazli* motorlar kiradi.

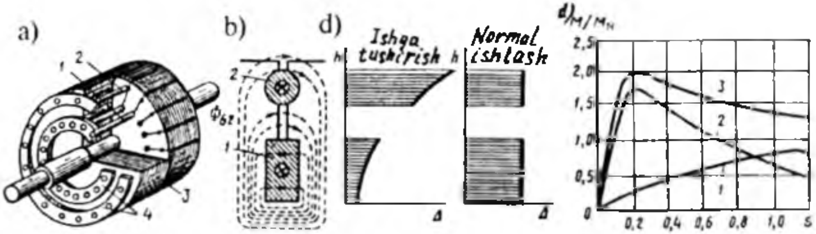


14.4-rasm. *Chuqur pazli motor rotorining umumiy ko'rinishi (**a**) (bunda: 1 — «olmaxon katagi»ning sterjenlari, 2 — rotorning po'lat o'zagi); sterjen joylashgan chuqur pazning qirqimi(**b**) va tok zichligi D ning ishga tushirish paytida (1) va normal ishlashida (2) tarqalish diagrammasi (**d**); **Φ**$_{\sigma 2}$ — tarqoq magnit oqim; **h** — paz balandligi.*

1. ***Chuqur pazli asinxron motor.*** Bunday motorlarda rotor pazining balandligi uning enidan 6÷12 marta katta bo'ladi (14.4-rasm). Bu pazlarda qisqa tutashgan mis yoki aluminiy sterjenlar joylashgan bo'ladi. Ishga tutushirishning boshlang'ich paytida (s=1) rotordagi tok chastotasining o'zgarishi katta bo'ladi va tokning tarqalishi asosan induktiv qarshilikka bog'liq bo'ladi. Shu sababli sterjenning yuqori qismida tokning siqilishi vujudga kelib, aktiv qarshilik oshishi tufayli ishga tushirish momenti oshadi. Sirpanish $s = s_N$ bo'lganda rotorning

chastotasi $f_2 = f_1 \cdot s$ kichik bo'lganligidan va uning induktiv qarshiligi ham kichik bo'ladi. Bu holda tokning tarqalishi sterjen balandligi bo'ylab bir xilda bo'ladi (14.4,d-rasm, 2-chiziq). Natijada rotorning aktiv qarshiligi tezda kamayadi va bir vaqtning o'zida rotordagi tarqoq magnit oqimi $\Phi_{\sigma 2}$ ning o'zgarishi x'_2 ning o'zgarishiga olib keladi. Chuqur pazli motorlarda ishga tushirish momentining karraligi $M_{i.t}/M_N = 1{,}2 \div 1{,}4$, ishga tushirish tokining karraligi esa $I_{i.t}/I_N = 4{,}5 \div 6{,}5$ ni tashkil qiladi.

2. *Qo'sh katakli motor.* Bu motorning rotori ikkita qisqa tutashgan chulg'amlardan iborat. Tashqi katak (2) *ishga tushirish chulg'ami* hisoblanib, uning ko'ndalang kesim yuzasi kichik bo'lgan sterjenlardan



14.5-rasm. *Qo'sh katakli motor rotorining umumiy ko'rinishi (**a**) (bunda: 1 – ishchi katak sterjenlari, 2 – ishga tushirish (chulg'ami) sterjenlari, 3 – rotorning po'lat ozagi; 4 – sterjenlarni qisqa tutashtiruvchi halqalar); **b** – 1- va 2- sterjenlar joylashgan pazning qirqimi; **d** – tok zichligining ishga tushirish paytida (1) va normal ishlashida (2) tarqalish diagrammasi; **e** – mexanik xarakteristikalari (bunda: 1 – ishga tushirish chulg'ami momenti; 2 – ishchi chulg'am momenti; 3 – qo'sh katakli motorning natijaviy momenti).*

iborat, shu sababli uning aktiv qarshiligi katta bo'ladi. Ichki katak (1) *ishchi chulg'am* deyiladi va u ko'ndalang kesim yuzasi katta bo'lgan sterjenlardan iborat, shu sababli uning aktiv qarshiligi kichik bo'ladi. Ishga tushirish katagi bronza yoki latundan, ishchi chulg'ami esa misdan tayyorlanadi.

Sterjenlarning pastki qismi tarqoq oqim bilan ularning yuqori qismiga nisbatan ko'proq ilashadi (14.5-rasm). Sterjenlarning induktiv qarshiligi ularning pastki tomonida juda katta bo'ladi. Shu sababli rotor tokining deyarli hammasi ishga tushirish katagidan o'tadi. Rasmda ishga tushirish va normal ishlash toklari zichliklarining taqsimlanishi ko'rsatilgan.

Elektr jihatdan ishga tushirish va ishchi chulg'amlari parallel ulangan bo'ladi. Shu sababli rotor toki chulg'amlarning to'la qarshiliklariga teskari mutanosib bo'ladi:

$$I_{2(i.t)} / I_{2(ish)} = Z_{2(ish)} / Z_{2(i.t)} =$$

$$= \left(\sqrt{r^2_{2(ish)} + x^2_{2(ish)}}\right) / \left(\sqrt{r^2_{2(i.t)} + x^2_{2(i.t)}}\right). \quad (14.6)$$

Ishga tushirishning boshlang'ich paytida ($s = 1$) katakning induktiv qarshiligi aktiv qarshilikdan bir necha barobar katta bo'ladi. Shuning uchun rotordagi tok ishga tushirish katagi orqali oqadi. Rotorning tezligi osha borgan sari sirpanish s va chastota f_2 kamayadi. Bu jarayonda rotordagi tok ishga tushirish katagidan ishchi katakka o'ta boshlaydi. Natijada sirpanish s juda kichik bo'ladi va tokning tarqalishida induktiv qarshilik kam ta'sir etadi va tok asosan ishchi katagi orqali o'tadi.

Qo'sh katakli asinxron motorining mexanik xarakteristikasi 14.5,*d*-rasmda ko'rsatilgan. Bunday motorda ishga tushirish momentining karraligi $M_{i.t} / M_N = 1,3 \div 1,7$ ishga tushirish toki karraligi esa $I_{i.t} / I_N = 4,5 \div 6$ bo'ladi.

Chuqur pazli va qo'sh katakli motorlarning ishga tushirish xarakteristikalari ancha yaxshi bo'lsa ham, rotor sterjenlarining induktiv qarshiligi katta bo'lgani sababli, ularning quvvat koeffitsientlari kichikroq bo'ladi. Bundan tashqari, bunday rotorlarni tayyorlash texnologiyasi murakkab va tannarxi qimmat bo'lganligi ularning kamchiligidir.

14.3. Uch fazali asinxron motorlarning aylanish chastotasini rostlash usullari

Asinxron motorlarning aylanish chastotasini rostlash muammosi muhim ekspluatatsion ahamiyatga ega. Sanoatning ayrim sohalarida motorlarning rostlash harakteristikalariga juda yuksak (keng ko'lamda rostlanishi, bir tekis rostlanishi va iqtisodiy samarali bo'lishi kabi) talablar qo'yiladi.

Asinxron motorning aylanish chastotasi (13.3) formula, ya'ni

$$n = n_1(1 - s) = 60 f_1 (1 - s) / p$$

bo'yicha aniqlanadi. Bundan ko'rinishicha, motorning aylanish chastotasini rostlash uchun unga berilayotgan kuchlanish chastotasi f_1 ni, juft qutblar soni "p" ni va sirpanish "s" ni o'zgartirish kerak ekan.

a) Kuchlanish chastotasini o'zgartirish yo'li bilan aylanish chastotani rostlash (chastotali rostlash). Motorning aylanish chastotasini bunday

usul bilan rostlashda o'zgaruvchan aylanish chastotali sinxron generator, elektr-mashinali yoki boshqariladigan yarim o'tkazgich ventilli (tiristorli) statik (ya'ni aylanmaydigan) chastota o'zgartgichlardan foydalaniladi.

Chastotali rostlashning asosiy qonunini birinchi marta akademik M.P. Kostenko ta'riflab bergan va u *quyidagi tenglama bilan* aniqlanadi:

$$U'_1 / U_1 = (f'_1 / f_1)\sqrt{M'/M}\,, \qquad (14.7)$$

bunda: U_1 va M – f_1 chastotadagi kuchlanish va moment; U'_1 va M' – o'zgartirilgan f'_1 chastotaga mos keladigan kuchlanish va moment.

(14.7) ga binoan, motorning o'ta yuklanish qobiliyatini, quvvat koeffitsientini va FIK ni talab qilingan qiymatda o'zgarmas holda saqlash uchun chastota f_1 ni o'zgartirish bilan bir vaqtda stator chulg'amiga berilayotgan kuchlanish U_1 ni ham o'zgartirish kerak ekan.

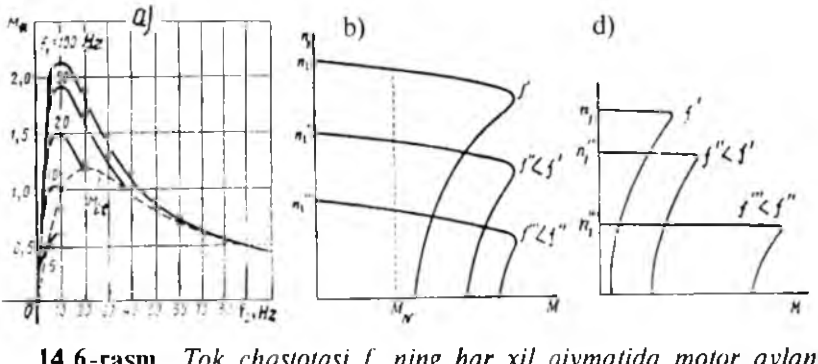
Agar motorning aylanish chastotasi yuk momenti o'zgarmas (M=M'=const) bo'lgan shartda rostlansa, unda *motorga beriladigan kuchlanishni tok chastotasining o'zgarishiga mutanosib ravishda o'zgartirish zarur bo'ladi*, ya'ni:

$$U'_1 = U_1 \cdot f'_1 / f_1\,. \qquad (14.8)$$

Agar aylanish chastotani rostlash motor quvvati o'zgarmas ($P_{em} = M \cdot \omega_1$=const) bo'lgan shartda amalga oshirilsa, unda beriladigan kuchlanishni *quyidagi qonunga mos* o'zgartirish kerak bo'ladi:

$$U'_1 = U_1 \cdot \sqrt{f'_1 / f_1}\,. \qquad (14.9)$$

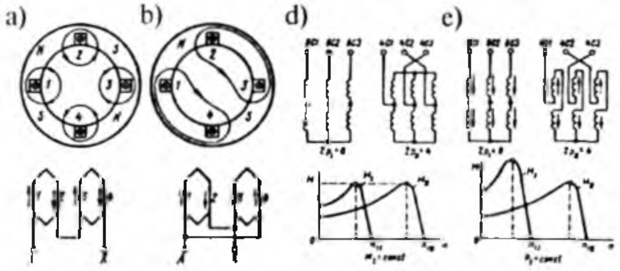
Bunda motorning quvvati aylanish chastotaning ko'payishiga



14.6-rasm. *Tok chastotasi f_1 ning har xil qiymatida motor aylanish chastotasini U_1/f_1 = const sharti boyicha rostlashdagi aylantiruvchi momenti M ning chastota f_1 ga nisbatan o'zgarish grafigi (**a**) hamda M= const (**b**) va P_2 = const (**d**) shartlar bajarilgandagi mexanik xarakteristikalar.*

mutanosib ravishda oshadi. Asinxron motorlarning aylanish chastotasini stator toki chastotasi f_1 orqali rostlashda uning energetik xarakteristikalari o'zgarmasdan qolishi va aylanish chastotaning bir tekis rostlanishi *uning afzalligi* bo'lsa, bu usulning murakkabligi va qimmatligi esa *uning jiddiy kamchiligidir*.

b) Motorning aylanish chastotasini juft qutblar sonini o'zgartirish yo'li bilan rostlash. Motorning aylanish chastotasi juft qutblar soniga teskari mutanosibda o'zgaradi. Juft qutblar soni stator chulg'amining ulanishi va chulg'am qadamiga bog'liq bo'ladi.



14.7-rasm. *Stator faza chulg'amining qutblar sonini o'zgartirish uchun qayta ulash sxemasi:* ***a*** *— 2p = 4 da va* ***b*** *— 2p = 2 da uch fazali asinxron motor qutblar sonini qayta ulash sxemalari hamda uning aylantiruvchi sxemasi M = const (**d**) va aylanish chastotasi n = const (**e**) rejimlarida mexanik xarakteristikalari.*

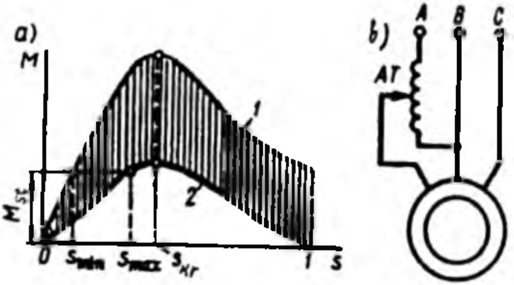
14.7-rasmda stator chulg'amining qutblar sonini o'zgartirishning eng oddiy sxemasi keltirilgan. Bu sxema bo'yicha stator chulg'amining qutblar soni ikki marta o'zgaradi. Bunda stator chulg'amining har bir fazasi ikkiga bo'linib, ketma-ket ulanishdan parallel ulanishga o'tkaziladi.

1 va 2, 3 va 4-g'altaklarning parallel ulanishi qutblar sonini ikki marta kamaytirib, motorning aylanish chastotasini ikki marta oshiradi. Agarda motorning aylanish chastotasini uch yoki to'rt karra oshirish kerak bo'lsa, u holda statorga qo'shimcha yana bitta chulg'am joylashtiriladi.

Qutblar soni o'zgartirilib, aylanish chastotasi rostlanadigan asinxron motorlarni ***ko'ptezlikli motorlar*** deyiladi. Bunday motorlarning rotori qisqa tutashgan bo'ladi. 14.7-rasmda stator chulg'ami qutblar soni 2:1 va 8:4 nisbatlarga o'zgaradigan sxemalar ko'rsatilgan. Bu rasmdagi

"c" sxema M_2 =const, "d" sxema esa P_2 = const hollar uchun qutblar sonini o'zgartiradi va motorning shu rejimlarga mos bo'lgan mexanik xarakteristikalari ko'rsatilgan.

Katta o'lchamga ega bo'lish va tannarxining qimmatligi ko'p tezlikli motorlarning kamchiliklari hisoblanadi. Bundan tashqari motorning aylanish chastotasini f =50 Hz = const bo'lganda rostlash bir tekis bo'lmay pog'onali bo'ladi va motorning juft qutblar soni r = 1; 2; 3; 4 larda stator chulg'ami hosil qilgan aylanma magnit maydoni n_1 ning aylanish chastotasi 3000: 1500: 1000 : 750 nisbatda o'zgaradi.



14.8-rasm. *Asinxron motorga beriladigan uch fazali kuchlanish sistemasi simmetrikligini o'zgartirib aylanish chastotasini rostlashda mexanik xarakteristika (**a**), (bunda: **1** — simmetrik va **2** — nosimmetrik kuchlanishlarda) hamda **b** — tarmoqqa ulash sxemasi.*

d) Sirpanishni o'zgartirish yo'li bilan asinxron motorning aylanish chastotasini rostlash. Sirpanish s ni o'zgartirish uchun stator chulg'amiga beriladigan kuchlanishni (12.5,*a*-rasm), uch fazali kuchlanish simmetrikligini (14.8-rasm) va rotor zanjirining aktiv qarshiligini o'zgartirish (12.5,*b*-rasm) kerak bo'ladi.

Motorga beriladigan uch fazali kuchlanish simmetrikligini o'zgartirish uchun uning bitta fazasiga avtotransformator ulab shu fazaning kuchlanish qiymati o'zgartiriladi. Bu holda teskari maydon ham vujudga kelib, natijaviy elektromagnit moment ($M = M_{to'g'} - M_{tes}$) kamayadi; bu esa sirpanish s ni o'zgartiradi (14.8-rasm). Aylanish chastotani rostlashning bu usuli faqat kam quvvatli asinxron motorlarda qo'llaniladi.

e) Rotor zanjiriga reostat ulab asinxron motorning aylanish

chastotasini rostlashda (12.5,*b*-rasmga qarang) aylanish chastota bir tekis va keng ko'lamda o'zgartiriladi. Bu usul bilan amaliyotda aylanish chastota kichik oraliqlarda o'zgartirilishi mumkin, chunki rotor zanjiridagi qo'shimcha qarshilik oshirilganda rotordagi elektr isroflar oshib ketadi.

Nazorat savollari:

1. Qisqa tutashgan rotorli âsinxron motorlarni ishga tushirishning qanday usullarini bilasiz?

2. Faza rotorli asinxron motorlarni ishga tushirishning qanday usulini bilasiz?

3. Ishga tushirish xossalari yaxshilangan asinxron motorlarning qanday turlarini bilasiz?

4. Faza rotorli asinxron motorning aylanish chastotasi qanday rostlanadi?

15-BOB. UCH FAZALI ASINXRON GENERATOR

15.1. Asinxron mashinaning generator rejimi

Asinxron mashina, boshqa elektr mashinalari kabi, E. Lens kashf qilgan elektr mashinalarining qaytarlik xossasiga binoan, motor rejimida hamda generator rejimida ishlashi mumkin. Konstruktiv bajarilishi bo'yicha asinxron generator asinxron motordan farq kilmaydi. Motor rejimidan generator rejimiga o'tkazish uchun, stator chulg'ami tarmoqqa ulangan holda birlamchi motor yordamida asinxron mashinaning rotorini stator maydonining aylanayotgan tomoniga aylanish chastotasini maydon aylanish chastotasidan katta ($n > n_1$) qilib aylantiriladi. Bu holda mashinaning sirpanishi

$$(-s) = (n_1 - n) / n_1 \qquad (15.1)$$

manfiy ishoraga ega bo'ladi. Amalda asinxron generatorning normal ish rejimida $(-s) \leq (6 \div 8)$ % bo'ladi.

Asinxron mashina generator rejimda stator va rotor chulg'amining o'tkazgichlari aylanma maydon bilan go'yo qarama-qarshi yo'nalishda kesishadilar. Motor rejimda mazkur o'tkazgichlar mos yo'nalishda kesishadilar. Shu sababli generatorning vektor diagrammasida $\underline{E}_{2s}$ (demak, $\underline{E}'_{2s}$ ning ham) va $\underline{E}_1$ vektorlarining yo'nalishlari shartli ravishda teskari fazada qo'yilishi kerak.

Rotor toki xususida mulohazalar quyidagilardan iborat. Rotor tokining umumiy ifodasi:

$$I_2 = E_2 \cdot (-s) / \sqrt{r_2^2 + (-s)^2 x_2^2}\,. \qquad (15.2)$$

Rotor tokining aktiv tashkil etuvchisi

$$I_{2a} = I_2\cos\psi_2 = (E_2 \cdot (-s) / \sqrt{r_2^2 + (-s)^2 x_2^2}\,) \cdot (r_2 / \sqrt{r_2^2 + (-s)^2 x_2^2}\,) =$$

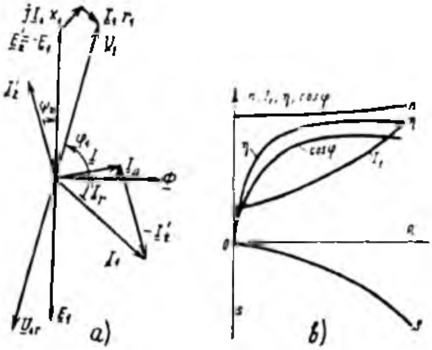
$$= (E_2 \cdot (-s) \cdot r_2\,) / (\,r_2^2 + s^2 x_2^2) \qquad (15.3)$$

o'zining ishorasini o'zgartiradi, chunki sirpanishning ishorasi manfiy $(-s)$; rotor tokining reaktiv tashkil etuvchisi esa

$$I_{2r} = I_2\sin\psi_2 = [E_2 \cdot (-s) / \sqrt{r_2^2 + (-s)^2 x_2^2}\,] \cdot [x_2 \cdot (-s) / \sqrt{r_2^2 + (-s)^2 x_2^2}\,] =$$

$$= (E_2 \cdot s \cdot x_2\,) / (\,r_2^2 + (-s)^2 x_2^2) \qquad (15.4)$$

o'zining ishorasini o'zgartirmaydi (ya'ni motor rejimidagi kabi bo'ladi), chunki $(-s)^2$ – musbat kattalik.



15.1-rasm. *Asinxron generatorning vektor diagrammasi (**a**) va ish xarakteristikalari (**b**).*

Rotor toki aktiv tashkil etuvchisi I_{2a} ning o'z ishorasini o'zgartirishi, elektromagnit momentning ishorasini o'zgartiradi, demak, u tormozlovchi moment bo'ladi, reaktiv tashkil etuvchisi I_{2r} ning o'z ishorasini saqlab qolishi, motor rejimidagi singari, magnit maydonni hosil qilish uchun mashina tarmoqdan magnitlovchi tokni oladi.

Asinxron generatorning vektor diagrammasi 15.1,*a*-rasmda ko'rsatilgan. Bundan ko'rinishicha, generator rejimda burchak $\varphi_1 > \pi/2$ va, demak, $P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos\varphi_1 < 0$. Bu esa aktiv quvvatning iste'mol qilinishini emas, balki tarmoqqa berilishini ko'rsatadi.

Vektor diagrammada stator toki $\underline{I}_1$ (11.19) tenglamalar sistemasidagi asinxron mashina toklarining muvozanat tenglamasidan topiladi, ya'ni:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + (-\underline{I}'_2),$$

kuchlanish $\underline{U}_1$ ham (11.19) dagi kuchlanish va EYK lar muvozanat tenglamasidan aniqlanadi, ya'ni:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + j\underline{I}_1 x_1 + \underline{I}_1 r_1.$$

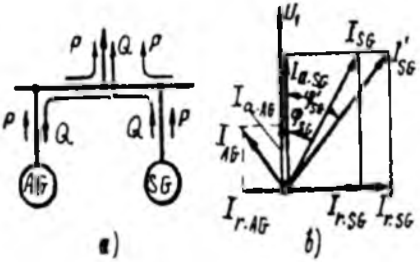
Vektor $\underline{U}_1$ tarmoq kuchlanishini ifodalaydi. Tarmoq kuchlanishini muvozanatlovchi generator kuchlanishining vektori U_{1G} qarama-qarshi yo'nalishga ega bo'ladi, ya'ni $\underline{U}_{1G} = -\underline{U}_1$. Generatorning tarmoqqa beradigan aktiv quvvatini rostlash rotorning burchak tezligini o'zgartirish orqali erishiladi. Asinxron generatorning ish xarakteristikalarini (15.1,*b*-rasm) doiraviy diagrammadan yoki almashtirish sxemasidan aniqlab qurish mumkin. Yuklamaning oshishi bilan kuchlanish U_{1G}= const qilish uchun rotorning aylanish chastotasi *n* oshiriladi.

15.2. Asinxron generatorning elektr tarmog‘i bilan parallel ishlashi

15.2,*a*-rasmda asinxron generatorning sinxron generator bilan parallel ishlash sxemasi ko‘rsatilgan. Bunda mashinalar va tarmoq orasida, hamda o‘zaro mashinalar orasida aktiv (P) va reaktiv (Q) energiyalarning yo‘nalishi strelkalar bilan ko‘rsatilgan. 15.2,*b*-rasmda sinxron generator ish rejimiga asinxron generatorning salbiy ta’siri yaqqol tasvirlangan. Kuchlanish vektori $\underline{U}_1$ ni sinxron generator (SG) bilan umumiy yuklamaga parallel ishlalayotgan asinxron generator (AG) ning kuchlanishi $\underline{U}_{1G}$ deb hisoblash kerak.

Bunday izohlashda $\underline{U}_{1G}$ vektorini asinxron mashinaning stator chulg‘amiga berilgan tarmoq kuchlanishi vektori $\underline{U}_1$ ga nisbatan 180° ga burish kerak, va bu holda AG ning tok vektori $\underline{I}_{AG}$ kuchlanish vektori $\underline{U}_1$ dan oldin keladi (15.2,*b*-rasm). AG da $\underline{U}_1$ dan oldin keladigan tokning reaktiv tashkil etuvchisi $\underline{I}_{r.AG}$ mavjudligidan SG da ham shunday tok bo‘lib, bu vektor esa kuchlanish vektori $\underline{U}_1$ dan orqada qolgan bo‘ladi. Shu sababli burchak $\varphi'_{SG} > \varphi_{SG}$ bo‘lib, natijada, $\cos\varphi'_{SG}$ nisbatan kamayadi (bu yerda φ_{SG} – AG ulanmagan holdagi SG ning kuchlanish $\underline{U}_{SG} = \underline{U}_1$ va tok $\underline{I}_{SG}$ vektorlari orasidagi siljish burchagi).

AG ni qo‘zg‘atish uchun tarmoqdan reaktiv energiyaning olinishi uning *kamchiligi hisoblanadi*, chunki u energiya manbasi bo‘lib ishlaganda, iste’molchilarga aktiv energiya bilan bir qatorda reaktiv energiya ham berishi (masalan, transformator va asinxron motorlarda magnit maydonni hosil qilish uchun) kerak bo‘ladi. Shu sababli AG lar ayrim hollarda kam quvvatli GES va shamol elektr stanstansiyalarida ishlatiladi.



15.2-rasm. *Asinxron va sinxron generatorlarning parallel ishlashi (a) va vektor diagrammasi(b); Q – reak.quvvat.*

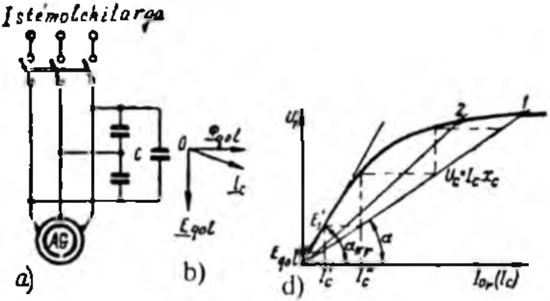
Ta’kidlash lozimki, ilmiy izlanishlar natijalarining ko‘rsatishicha, elektr energetika sistemasida katta quvvatli AG sinxron generatorlar

bilan parallel ishlatilganda *kam chastotali tebranishlarni so'ndirishda ahamiyatli* ekanligi isbotlangan.

15. 3. Elektr tarmog'iga ulanmagan asinxron generatorning o'z-o'zini qo'zg'atishi va yuklama bilan ishlashi

Asinxron generatorning o'z-o'zini qo'zg'atishi. Bunday rejimda AG ni qo'zg'atish rotor o'zagidagi qoldiq magnit maydoni va stator chulg'amiga ulanadigan kondensatorlar yordamida amalga oshiriladi (15.3,*a*-rasm).

AG ning stator chulg'amiga kondensator S ulanganligidan tok $I_r = I_c$ uning kuchlanishiga nisbatan oldin keladi (15.3,*b*-rasm). Agar qoldiq magnit oqim (Φ_{qol}) bo'lsa, rotor aylanganda stator chulg'amida kam miqdordagi E_{qol} hosil bo'ladi (15.3,*d*-rasm). Uning ta'siridan "stator



15.3-rasm. *O'z-o'zini qo'zg'atishli asinxron generator(**a**), vektor diagramma (**b**) va AG ning o'z-o'zini qo'zg'atish jarayonini tushuntirishga oid(**d**).*

chulg'ami – kondensatorlar" zanjirida kuchlanish vektori $\underline{U}_1$ dan oldin keluvchi reaktiv tok $\underline{I}_C$ vujudga keladi. Bu tokning reaktiv tashkil etuvchisi $\underline{I}_r$ oqim Ф bilan bir xil yo'nalishda bo'ladi. Shuning uchun sig'im toki $\underline{I}_C$ ning stator chulg'amida hosil qilgan MYK mashinani magnitlaydi.

O'z-o'zini qo'zg'atish jarayoni AG va kondensatorlarning kuchlanishlari teng bo'lgunga qadar, ya'ni

$$I_C\ \omega_1 L_1 = I_C\ /(\omega_1 C), \qquad (15.5)$$

davom qiladi. Bunda $L_1 = (x_1 + x_2)/\ \omega_1$ – AG ning induktivligi; C – bir fazaga to'g'ri keladigan sig'im.

Kondensatorning sig'imi kamaytirilsa, $U_C = I_C x_C$ xarakteristikaning og'ish burchagi α kattalashib, AG ning kuchlanishi kamaya boradi va $I_C x_C$ to'g'ri chizig'i salt ishlash egri chizig'ining to'g'ri chiziqli qismi

bilan mos tushganda AG o'z-o'zini qo'zg'ata olmaydi (15.3,c-rasm).

Birlamchi motor bilan asinxron generator rotorini aylantirib

$$n = 30\,\omega_1 / (\pi p) \qquad (15.6)$$

formula bilan aniqlanadigan aylanish chastotaga erishganda, statorda ω_1 chastota tebranishlari vujudga keladi va $\omega_{kr} = 1/\sqrt{L_k C}$ –chastotaning eng yuqori kritik qiymati $\omega_1 > \omega_{kr}$ bo'lganda o'z-o'zini qo'zg'atish buziladi.

Asinxron generatorning yuklama bilan ishlashi. Sirpanishni aniqlash $s = (n_1 - n)/n_1$ formulaga binoan yuklama bilan ishlayotgan AG kuchlanish chastotasini f_1 = const qilish uchun sirpanishning o'zgarishiga mos ravishda aylanish chastota *n* ni o'zgartirish lozim bo'ladi. Buni amalga oshirish murakkab hisoblanadi, chunki birlamchi motorning aylanish chastotasi regulator (rostlagich) bilan o'zgarmas qilinganda AG ning sig'imi va yuklamaning o'zgarmas qiymatlarida chastota pasayadi.

Bu quyidagicha tushuntiriladi. AG yuklama bilan ishlaganda, stator chulg'amining induktiv va aktiv qarshiliklarida kuchlanish pasayishi tufayli, uning kuchlanishi biroz kamayadi. *Bunga yana ikkinchi sabab,* odatda, yuklama bilan ishlaganda AG ning magnitlovchi toki ham biroz kamayadi, chunki kondensator tokining bir qismi rotor tokining reaktiv tashkil etuvchisini va yuklama tokini qoplashga sarflanadi.

Kuchlanishning kamayishi AG magnit sistemasining to'yinish darajasini kamaytiradi va, natijada, asinxron mashinaning induktivligi L_1 ortadi; uning ortishi esa $\omega_1 = 2\pi f_1 = 1/\sqrt{L_1 C}$) formulaga binoan, chastota f_1 ning kamayishiga olib keladi va $x_s = 1/(2\pi f_1 C)$ formulaga asosan, kondensatorning induktiv qarshiligi x_s ortadi, natijada esa, tok I_s kamayadi. Demak, AG ning ishiga yuklamaning xarakteri katta ta'sir qilar ekan.

Agar AG ning yuklamasi sof aktiv bo'lganda kondensatorlarning quvvati generatorning reaktiv quvvatiga teng bo'lishi lozim bo'lsa, aktiv-induktiv yuklamada esa yuklamani ham reaktiv quvvat bilan ta'minlash maqsadida kondensator batareyasining quvvatini oshirish zarur bo'ladi.

O'z-o'zini qo'zg'atadigan AG kondensator batareyasining quvvati ancha katta, ya'ni nominal quvvatining 70÷100 % ni tashkil qiladi. Bu esa qurilmaning tannarxini oshiradi.

Amaliy jihatdan, tarmoqqa ulanmagan AG ni sof aktiv yuklama

bilan ishlatishda kuchlanish va chastotaning o'zgarish xarakteristikalari yetarli darajada qanoatlanarli bo'lmaganligidan AG larning qo'llanish sohalari cheklangan.

Asinxron mashinalarning ishga tushirish xarakteristikalari yaxshiligi tufayli ularni *aviamotorlarni* ishga tushirish uchun *starter* sifatida foydalaniladi. *So'ngra generator rejimga* o'tkazilib samolyot bortida o'zgaruvchan tok manbasi sifatida ishlatilishi mumkin.

O'z-o'zini qo'zg'atishli asinxron generatorlar rostlanuvchi elektr yuritmada ishlatilishi mumkin (masalan, rekuperativ tormozlashda).

Asinxron mashina generator sifatida avtomobil va traktorlarda ishlatiladigan dizel motorlarini sinash stendlarida ishlatiladi. Bunda motor sovuq paytida asinxron mashina elektr motori sifatida ishlab, uni qizdiradi va keyin, u generator rejimiga o'tkaziladi. Bu holda AG tormozlovchi momentni hosil qilib, avtomobil va traktor motorlariga yuk vazifasini bajaradi.

Qo'lda ishlatiladigan elektr instrumenti uchun yuqori chastotali elektr energiya manbayi sifatida; avtomatik boshqarish sistemalarida, ergashuvchi elektr yuritmada va hisoblash qurilmalarida ichi kavak yoki qisqa tutashgan rotorli asinxron taxogeneratorlar qo'llaniladi.

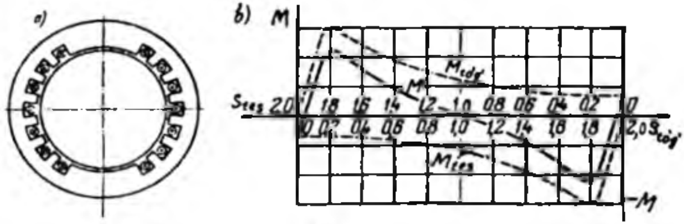
Nazorat savollari:

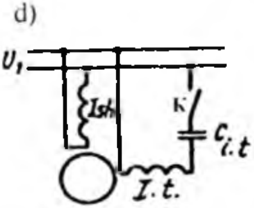
1. *Asinxron generatorning ishlash prinsipini so'zlab bering.*
2. *AG ning tarmoq bilan parallel ishlashidagi jarayonlar qanday kechadi?*
3. *AG ning o'z-o'zini qo'zg'atishi uchun qanday shartlar bajarilishi kerak?*
4. *AG ning afzalligi va kamchiliklari nimalardan iborat?*

16-BOB. BIR FAZALI ASINXRON MOTORLAR

16.1. Bir fazali asinxron motorning tuzilishi va ishlash prinsipi

Bir fazali asinxron motorlar ($P_2 \leq 600$ W) avtomatik qurilmalarda va uy xo'jaligi elektr asboblarida (ventilator, sovitgich, kir yuvish mashinasi, elektr ustara va boshqalar) ishlatiladi. Bir fazali asinxron motorning statorida bir fazali chulg'am bo'lib, rotorida esa qisqa tutashtirilgan chulg'am bo'ladi (16.1-rasm). Stator chulg'ami o'zak pazlarining 2/3 qismida joylashgan bo'ladi.





16.1-rasm. *Bir fazali asinxron motor statorining(**a**) va motorning mexanik xarakteristikalari (**b**); ishga tushirish chulg'ami bilan ta'minlangan bir fazali asinxron motorni kondensatorli ishga tushirish sxemasi (**d**); **K** — kalit.*

Chulg'amning pazlarda bunday joylashishi havo bo'shlig'ida magnit induksiyasi shaklining sinusoidalga yaqin bo'lishini ta'minlaydi.

Bir fazali asinxron motorning stator chulg'amiga bir fazali o'zgaruvchan tok berilganda pulslanuvchi magnit maydon hosil bo'ladi. Bu maydonni amplitudalari teng va bir-biriga nisbatan teskari bir xil aylanish chastotada aylanuvchi ikkita tashkil etuvchiga ajratish mumkin.

Bir fazali asinxron motorlar boshlang'ich ishga tushirish momentiga ega emas (16.1,*b*-rasm) va stator chulg'ami tarmoqqa ulanganda uning rotori aylanmaydi. Shuning uchun bunday motorlar ishga tushirish chulg'ami bilan ta'minlanadi (16.1,*d*-rasm). Aylanish yo'nalishi rotorning aylanish yo'nalishi bilan mos bo'lgan oqimni *to'g'ri* oqim $\Phi_{to'g'}$, rotorning aylanishiga nisbatan teskari aylanadigan oqimni *teskari* Φ_{tes} oqim deyiladi. Bu oqimlar to'g'ri $M_{to'g'}$ va teskari aylantiruvchi moment M_{tes} larni hosil qiladi. Bu momentlar bir-biriga nisbatan teskari

yo'nalishda bo'ladi. Natijaviy aylantiruvchi moment to'g'ri va teskari momentlarning yig'indisi bilan topiladi:

$$M_{nat} = M_{to'g'} + M_{tes}.$$

To'g'ri oqimga nisbatan rotorning sirpanishi:

$$s_{to'g'} = (n_{1(to'g')} - n) / n_{1(to'g')} = (n_1 - n) / n_1 = 1 - n / n_1,$$

teskari oqimga nisbatan rotorning sirpanishi esa:

$$s_{tes} = [(n_{1(tes)} - (-n)] / n_{1(tes)} = (n_{1(tes)} + n) / n_{1(tes)} = 1 + n / n_{1(tes)}.$$

Demak, bir fazali asinxron motor ishga tushirish momentiga ega emas. Shu sababli rotor qaysi tomonga tashqi kuch yordamida aylantirilsa, o'sha tomonga aylanadi. Bunday motorning ish xarakteristikalari uch fazali asinxron motornikiga nisbatan yomon. Bundan tashqari salt ishlayotgan bir fazali motorning aylanish chastotasi, teskari magnit oqimi hosil qilgan tormozlovchi moment ta'sirida uch fazali motorning aylanish chastotasidan kichik bo'ladi.

16.2. Kondensatorli asinxron motor va uch fazali qisqa tutashgan rotorli asinxron motorni bir fazali manbadan ishlatish

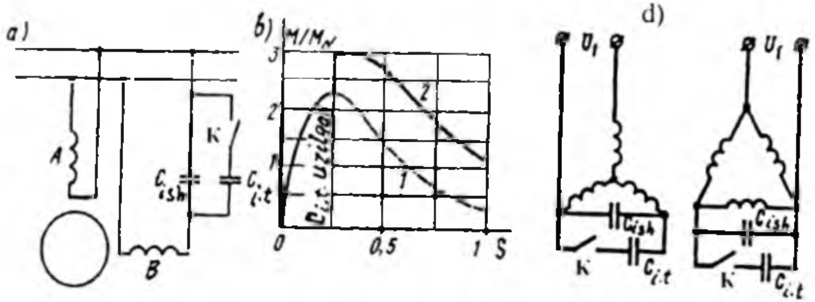
Kondensatorli asinxron motor. Bunday motorning statorida bir xil sondagi pazlarni egallagan va fazoda bir-biriga nisbatan 90° el. burchakka siljigan ikkita (normal rejimda "*ishchi*") chulg'am bo'ladi.

Aylanma magnit maydonini olish sharti bo'yicha u chulg'amlarning o'ramlar soni umumiy holda turli xil bo'ladi. Shuni esda tutish lozimki, kondensator sig'imining berilgan qiymati uchun yuklamaning faqat bitta qiymatida aylanma magnit maydoni olinib, boshqa yuklamalarda esa elliptik maydon hosil bo'ladi va motorning ish rejimi yomonlashadi. Yuklamaning o'zgarishi bilan kondensator sig'imini ham rostlash zarur bo'lib, bu holda motor sxemasi murakkablashadi.

Ayrim hollarda aylanma maydon olish uchun ishga tushirish paytida va biror-bir yuklamada kondensatorlar parallel ulanadi. Yuklamada bitta kondensator ishlasa ishga tushirishda ikkala kondensator ham ulanadi.

Kondensatorli motorlarning FIK xuddi shunday quvvatli uch fazali asinxron motornikiga yaqin, $\cos\varphi$ esa hatto, katta bo'lishi ham mumkin.

Uch fazali qisqa tutashgan rotorli asinxron motorlarni bir fazali asinxron motor sifatida ishlatish. Buning uchun uch fazali qisqa tutashgan rotorli asinxron motorni 16.2-rasmdagi sxemalar asosida ulash kerak bo'ladi. Bu sxemalar bo'yicha motorni ulash uchun



16.2-rasm. *Kondensatorli asinxron motor sxemasi (**a**) va uning mexanik xarakteristikasi (**b**); uch fazali asinxron motorni bir fazali tarmoqdan ishlatishda stator chulg'amini ulash sxemalari(**d**);* ***K** – kalit.*

chulg'amlarning 6 ta uchlari ham tashqariga (klemmalar qutisiga) chiqarilgan bo'lishi lozim. Bu rasmdagi sxemalar bo'yicha ishlayotgan motor bir fazali motorga ekvivalent hisoblanadi. Uch fazali motor bir fazali motor sifatida ishlaganda uning quvvati uch fazali motor nominal quvvatining taxminan 70% ni tashkil qiladi. Bunday motorlar kichik yuklamada ishlaganda ularning texnik ko'rsatkichlari nisbatan yomon bo'ladi. Sxemalardagi (16.2-rasm) ishga tushirish qarshiliklari (sig'im va aktiv qarshilik) motor ishga tushirilgandan keyin uzib qo'yiladi. Agar sig'im motorning ish jarayonida ham sxemada ulanib qolsa uning yuklama rejimida ishlashini yaxshilaydi.

Nazorat savollari:

1. Bir fazali asinxron motorning tuzilishi va ishlash prinsipini so'zlab bering.

2. Bir fazali motor qanday kamchiliklarga ega?

3. Uch fazali qisqa tutashgan rotorli asinxron motorni qanday qilib bir fazali motor sifatida ishlatish mumkin?

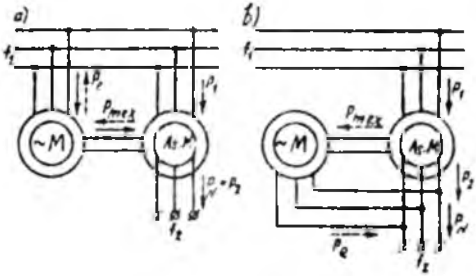
4. Kondensatorli asinxron motorning tuzilishi va ishlash prinsipi qanday?

5. Kondensatorli motorning xarakteristikalarini qanday qilib yaxshilash mumkin?

17-BOB. ASINXRON MASHINALARNING MAXSUS MAQSADLI VA ZAMONAVIY TURLARI. ASINXRON MOTORLARNI ISHLATISHGA OID AMALIY MASLAHATLAR

17.1. Maxsus maqsadli asinxron mashinalarning ba'zi turlari

Ko'pgina sohalarda umumiy maqsadli asinxron motorlar va generatorlar bilan bir qatorda maxsus maqsadli asinxron mashinalari ham ishlatiladi. Bunday maxsus mashinalarga asinxron chastota o'zgartgich, faza rostlagich, induksion regulator, aylanuvchi (buriluvchi) transformator, selsinlar, chiziqli motorlar va boshqalar kiradi. Ular yordamida chastotani, fazani va kuchlanish qiymatlarini rostlash; rotorning burilish burchagini shu burchakka yoki uning biror bir funksiyasiga mutanosib o'zgaradigan kuchlanishga aylantirish; o'zaro mexanik bog'liq bo'lmagan ikki yoki bir nechta o'qlarning



17.1-rasm. *Birlamchi (yurituvchi motori tarmoqqa (a) yoki chastota o'zgartgichning chiqishiga (b) ulangandagi asinxron chastota o'zgartgichning sxemalari;* P_e *– elektr quvvat;* P_{mex} *– mexanik quvvat; AsM – asinxron mashina.*

sinxron burilishi yoki aylanishini ta'minlash; mexanik obyektlarning chiziqli yoki yoysimon siljishini amalga oshirish mumkin.

Asinxron chastota o'zgartgich. Faza rotorli asinxron mashina chastota o'zgartgich sifatida ishlashi mumkin, chunki rotordagi tok chastotasi f_2 ga teng, ya'ni:

$$f_2 = f_1 s = p(n_1 \pm n) / 60, \qquad (17.1)$$

bunda "–" belgisi rotorning magnit maydoni bilan bir xil yo'nalishda aylanishini, "+" belgisi esa uning magnit maydoniga teskari tomonga aylanishini ko'rsatadi.

Asinxron chastota o'zgartgich faza rotorli asinxron mashina va uning valiga ulangan aylanish chastotasi rostlanadigan ishga tushirish

motoridan iborat (17.1-rasm). Asinxron mashinaning birorta (masalan, stator) chulg'ami, chastotasi f_1 bo'lgan uch fazali elektr tarmog'iga ulansa, boshqa chulg'amidan (rotor chulg'amidan) chastotasi $f_2= f_1s$ bo'lgan o'zgaruvchan tok olinadi.

$f_2 > f_1$ chastota olish uchun asinxron mashina stator magnit maydoni yo'nalishiga teskari bo'lgan tomonga aylantiriladi. Bunda chastota o'zgartgich elektromagnit tormoz ($s > 1$) rejimida ishlaydi, motor esa unga mexanik quvvat uzatadi.

$f_2 < f_1$ chastota olish uchun chastota o'zgartgich motor rejimida va stator magnit maydoni yo'nalishi bo'yicha aylantirilishi lozim. Bunda chastota o'zgartgich generator bo'lib ishlayotgan birlamchi motor hosil qilgan elektromagnit momenti ta'sirida tormozlanadi. Generator rejimida ishlayotgan motor elektr energiyasini asinxron mashina ulangan tarmoqqa uzatadi.

Chastota f_2 ni ravon bir tekis rostlash uchun birlamchi motor sifatida o'zgarmas tok motoridan foydalanib, uning aylanish chastotasini o'zgartirish kerak bo'ladi.

Kuchlanishni induksion rostlagich (regulator). Bunday regulator uch fazali buriluvchi avtotransformator ko'rinishda ishlab chiqariladi va uch fazali o'zgaruvchan kuchlanishni rostlash uchun ishlatiladi.

Induksion rostlagichning sxemasi 17.2,*a*-rasmda ko'rsatilgan. Bunda birlamchi chulg'am sifatida rotor chulg'ami ishlatilsa, ikkilamchi chulg'am sifatida esa stator chulg'ami ishlatiladi.

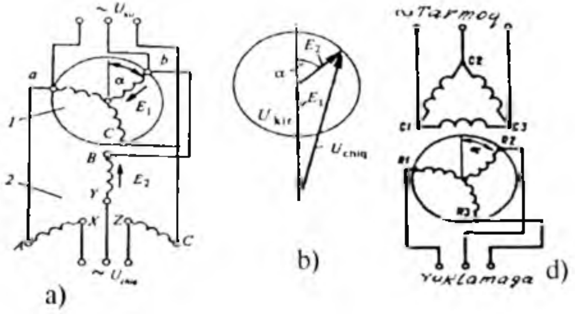
Induksion regulator uch fazali tarmoqqa ulansa, uning rotor va stator chulg'amlarining har bir fazasida EYK hosil bo'ladi:

$$\underline{U}_{reg} = \underline{E}_1 + \underline{E}_2 \approx \underline{U}_{kir} + \underline{E}_2, \qquad (17.2)$$

bu yerda: $\underline{U}_{kir} = \underline{U}_1 \approx \underline{E}_1$; $\underline{U}_2 \approx \underline{E}_2$ – chiqishdagi kuchlanish; $\underline{U}_{kir}$ – kirishdagi kuchlanish. (17.2) tenglamadan shu narsa ko'rinadiki, $\underline{U}_{kir}$ va $\underline{E}_2$ vektorlari geometrik qo'shilar ekan, shu sababli $\underline{U}_{reg}$ kuchlanishning qiymati $\underline{U}_{kir}$ va $\underline{E}_2$ vektorlari orasidagi burchakka bog'liq bo'ladi. Rotorning holatini o'zgarganda bu burchak o'zgarib turli qiymatli U_{reg} kuchlanishi olishi mumkin.

Faza rostlagich (fazoregulator). Faza regulator (17.2,*c*-rasm) konstruksiyasi jihatidan faza rotorli asinxron mashina bo'lib, ikkilamchi chulg'am kuchlanishining qiymati o'zgartirilmagan holda uning birlamchi kuchlanishga nisbatan fazasini o'zgartirib beradi. Uning

*17.2-rasm. Kuchlanishni induksion rostlagichning ulanish sxemasi (**a**) va vektor diagrammasi (**b**); faza regulatorning ulanish sxemasi (**d**).*



induksion regulatordan farqi shuki, fazoregulatorda rotor va stator chulg'amlari o'zaro elektr jihatdan ulanmagan, ya'ni transformator bog'lanishga ega, shuning uchun ham uni ayrim holda *buriluvchi transformator* deb ataladi.

Ikkilamchi chulg'am kuchlanishi fazasini rotorni statorga nisbatan burish bilan amalga oshiriladi (stator chulg'amini birlamchi chulg'am deyiladi).

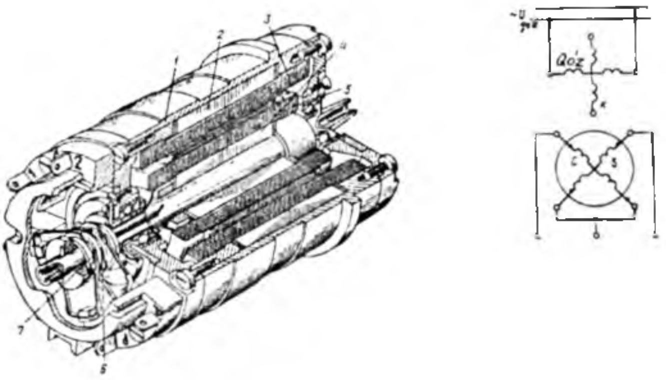
Agarda faza rotorli asinxron mashinaning rotori va statorining bir xil faza o'qlari mos tushsa, aylanuvchi magnit oqimi stator va rotor chulg'amlarini bir vaqtda kesib o'tadi demak, hosil bo'lgan EYK E_1 va E_2 larning fazalari ham bir xil bo'ladi. Rotorni u yoki bu tomonga α burchakka burib (17.2,*d*-rasm), kerak bo'lgan EYK fazasini olish mumkin, ya'ni:

$$e_2 = E_{2\max}\sin(wt \pm \alpha). \qquad (17.3)$$

Faza rostlagich avtomatikada faza bo'yicha xatolikni kompensatsiyalashda, boshqariladigan to'g'rilagichlarda, elektr o'lchov asboblarini tekshirishda va boshqalarda ishlatiladi.

Aylanuvchi (buriluvchi) transformator. Aylanuvchi transformator o'zgaruvchan tok elektr mikromashinasi bo'lib, u rotorning burilish burchagini kuchlanishga aylantirib beradi va bu kuchlanish shu burchakka yoki uning biror bir funksiyasiga mutanosib ravishda o'zgaradi.

Aylanuvchi transformatorning tuzilishi (17.3-rasm) xuddi faza rotorli asinxron motorniki kabi bo'ladi. Stator va rotorning har qaysiga bir-biriga nisbatan faza 90° ga siljigan ikkita bir fazali tarqalgan chulg'amlar joylashgan. Magnit o'zak bir-biridan izolatsiyalangan elektrotexnik po'lat plastina (tunuka)lardan yig'ilgan bo'ladi.



17.3-rasm. *Aylanuvchi transformatorning umumiy ko'rinishi (a): 1 – korpus (tana), 2 – stator, 3 – stator chulg'ami, 4 – rotor, 5 – rotor chulg'ami, 6 – kontakt halqalar, 7 – cho't'kalar; b – prinsipial sxemasi.*

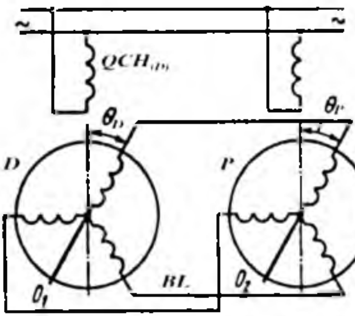
Aylanuvchi transformator burilish yoki aylanish rejimida ishlashi mumkin. Burilib ishlash rejimida rotorning statorga nisbatan holati buradigan mexanizm (reduktorli ijrochi motor) yordamida o'zgartiriladi. Bunda stator chulg'amining bittasi – qo'zg'atish chulg'ami (QCH) o'zgaruvchan tok manbayiga ulanadi, boshqa kompensatsiyalovchi chulg'ami (K) esa qarshilikka ulanadi yoki qisqa tutashtiriladi. Ayrim hollarda statorning ikkala chulg'amlari ham o'zgaruvchan tok manbalariga mustaqil ravishda ulanadi.

Rotorning sinus (S) va kosinus (S) chulg'amlari kontakt halqalarga cho'tkalar orqali ulangan bo'ladi. Aylanuvchi transformator uzluksiz aylanish ish rejimiga mo'ljallanganda qo'zg'atish va kompensatsiyalovchi chulg'amlar rotorda, sinus va kosinus chulg'amlar esa statorda joylashgan bo'ladi.

Bunday holatda kompensatsiyalovchi chulg'am qisqa tutashtiriladi, qo'zg'atish chulg'ami esa ikkita kontakt halqa yordamida o'zgaruvchan tok manbayiga ulanadi.

Selsinlar. Selsin ikkita chulg'amdan: birinchisi birlamchi yoki *qo'zg'atish* chulg'ami va ikkinchisi ***sinxronlovchi*** chulg'amdan iborat. Selsinlar bir va uch fazali bo'ladi.

17.4-rasm. *Indikator rejimida ishlayotgan selsining ulanish sxemasi: **D** – datchik (darakchi); **P** – priyomnik (qabul qilgich); **BL** – bog'lovchi liniya (sim)lar; **QCH** – qo'zg'atish chulg'ami; 0_1 va 0_2 – tegishlicha datchik va priyomniklarning bosh o'qlari.*



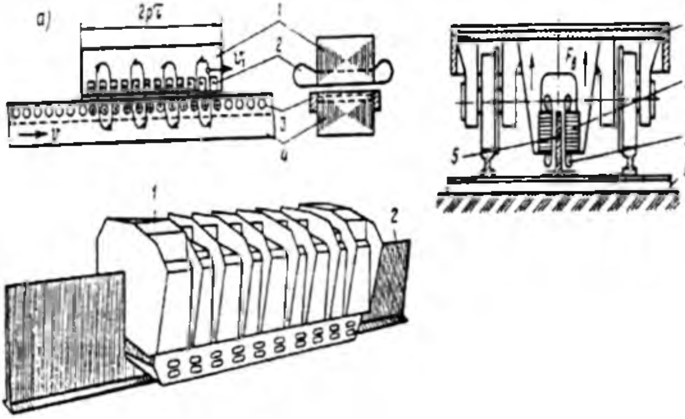
Uch fazali selsinning tuzilishi faza rotorli asinxron motorning tuzilishi kabi bo'ladi. Ular elektr vali sistemalarida ishlatiladi. Avtomatika sistemalarida esa bir fazali selsinlar ishlatiladi. Sinxronlovchi chulg'am statorda, qo'zg'atish chulg'ami esa odatda rotorda joylashgan bo'ladi. Bir fazali selsin ham kam quvvatli asinxron mashinasi kabi tuzilishga ega. Ular ayon va noayon qutbli bo'ladilar.

Selsinlar asosan indikator va transformator rejimlarida ishlaydi.

Indikator rejimida (17.4-rasm) selsin-priyomnikning rotori bosh o'q 0_1 ga ulangan bo'ladi. Bunda datchik D ning va qabul qiluvchi (priyomnik) R ning qo'zg'atish chulg'amlari umumiy o'zgaruvchan tok tarmog'iga, sinxronlash chulg'amlari esa bog'lovchi liniya orqali o'zaro ulanadi. Agar D va R rotorlari holatlari orasida nomuvofiqlik sodir bo'lsa, unda sinxronlovchi chulg'amlardan toklar o'tib, ular qo'zg'atish oqimi bilan ta'sirlashib qarama-qarshi yo'nalgan sinxronlovchi momentlarni hosil qiladi va, natijada nomuvofiqlik burchagi 0 ga teng bo'ladi.

Chiziqli asinxron motor. Bunday motorning tishli statori pazlariga uch fazali chulg'am joylashgan (17.5,*a*-rasm). Chiziqli motorning qo'zg'aluvchi qismi ***yuguruvchi*** deb ataladi, u asinxron mashina rotoriga o'xshash bo'ladi va, faqat tekislik bo'yicha *ilgarilanma* harakat qiladi. "Yuguruvchi"ning o'zagi elektrotexnik po'latdan tayyorlanib, uning pazlarida qisqa tutashgan chulg'am joylashtirilgan bo'ladi, yoki chulg'am o'rnida aluminiy va misdan yoki ferromagnit material (po'lat)dan tayyorlangan plastinalar ishlatilishi mumkin.

Chiziqli motorning ishlash prinsipi asinxron motorning ishlash



17.5-rasm. *Chiziqli asinxron motorning:* ***a****—elektromagnit sxemasi (bunda:* ***1*** *— stator,* ***2*** *— uch fazali chulg'am;* ***3****— qisqa tutashgan chulg'am,* ***4*** *— o'zak);* ***b*** *— temiryo'l transportining harakatlanuvchi qismi (1)da o'rnatish sxemasi (bunda:* ***2*** *— stator,* ***3*** *— chulg'am,* ***4*** *— uzun po'lat tilimi* ***5*** *ni relslar orasida mahkamlash uchun moslama);* ***d*** *— umumiy ko'rinishi (bunda:* ***1*** *— stator,* ***2*** *— uzun po'lat tilimi, ya'ni shinasi);* F_k *— chegaraviy effekt tufayli hosil bo'ladigan ko'ndalang kuch.*

prinsipi kabi bo'ladi. Uning energetik ko'rsatkichlari (η va cosφ) kichik.

Elektrotexnika sanoati rivojlangan ayrim mamlakatlarda (masalan, Yaponiya, Kanada, AQSH va boshq.) ekologik toza yuqori tezlikli yerusti (temiryo'l) transportida chiziqli asinxron tortish motorlari ishlatilmoqda. Yaponiyada magnit vositasida havoga ko'tarilib o'rnatilgan ("magnit yostiqli") chiziqli asinxron tortish motorlari sistemasining 1990-yillarda temiryo'l transportidagi tezligi n = 420 km/soat ni tashkil qilgan(so'nggi yillarda tezlik yana oshgan).

17.2. Asinxron motorlarning zamonaviy turlari

Elektr mashinasozlik sanoati rivojlangan mamlakatlarda, (masalan, Rossiyada va Ukrainada) quvvati bir vattning ulushini (kuchlanishi 127, 220 va 380 V) tashkil etadigan bir va ikki fazali asinxron mikromotorlardan, to quvvati 1000 kW (kuchlanishi 0,5; 0,6; 3; 6; 10 kV) gacha bo'lgan uch fazali asinxron motorlar keng miqdorda ishlab chiqarilmoqda. So'nggi ikki o'n yilliqda asinxron motorlarning Xalqaro

elektrotexnik komissiya (XEK) tavsiyalariga, CENELEK normalariga (28/64) va DIN 42673, DIN 42677 standartlar talablariga javob beradigan zamonaviy turlari (ularning FIK va quvvat koeffitsienti cosφ yuqori hamda shovqinsiz ishlash va 40 ming soatgacha ishlash imkoniga ega bo'lgan) ishlab chiqarilishi keng rivojlanmoqda.

Hozirgi vaqtda elektrotexnika sanoati taraqqiy qilgan mamlakatlarda *servis-faktor* (SF)li elektr motorlari ishlab chiqarilmoqda. GOST R – 2000 standartga asosan SF tushunchasi nominal kuchlanish va chastotalarda elektr motorlarining ruxsat berilgan o'ta yuklanishini bildiradi. Bunda chulg'am temperaturasining atrof muhitnikidan oshishi shu izolatsiyaning issiqqa chidamlilik klassi uchun yo'l qo'yilgan temperaturadan 10 % dan ko'p bo'lmasligi kerak

Odatda SF 1,15 va ayrim hollarda 1,1 ga teng son bo'lib, uning qiymati kataloglarda ko'rsatilgan bo'ladi va elektr motorlarining kuchlanish $U=U_N$ va chastotasi $f=f_N$ bo'lganda, uning nominal quvvati (P_N)ni SF gacha oshirish imkoni bo'lishligini bildiradi.

MDH mamlakatlarida (asosan Rossiyada) asinxron motorlarning yangi (AI, RA, 5A va 6A) seriyalari yaratildi. Yaroslavldagi (Rossiya) elektr mashinasozlik zavodi hozirgi vaqtda quvvati 100 kW gacha bo'lgan RA yangi seriyali asinxron motorlarni ishlab chiqarmoqda. Bularni ishlab chiqarishda asosan 4A, AIR, AIS seriyali asinxron motorlarning kamchilik va ijobiy texnik xarakteristikalari hisobga olindi. Vladimir (Rossiya) "Elektromotor" zavodi AI turkumi asosida, uning kamchilik va ijobiy texnik xarakteristikalari asosida yangi (quvvati 315 kW gacha bo'lgan 5A va 5AN seriyali) asinxron motorlarni ishlab chiqarmoqda.

Xorijiy firmalarda ishlab chiqarilayotgan uch fazali asinxron motorlarning quyidagi ayrim seriyalarini ko'rsatish mumkin. Masalan, kuchlanishi U = 220 / 380 V; ulanish sxemasi – Δ / Y; ikki qatlamli: 2AR90S2 (1,5 kW, n = 3000 ayl/min), AS1(2,2 kW, n = 3000 ayl/min), DB 55/2 (9 kW, n = 3000 ayl/min), BF4112M (5,5 kW, n = 3000 ayl/min), B3 (30 kW, n = 1500 ayl/min), FEK (37 kW, n = 1000 ayl/min).

O'zbekiston Respublikasi Andijon shahridagi "Elektrodvigatel" ishlab chiqarish birlashmasida xalq xo'jaligining turli sohalarida ishlatiladigan asinxron motorlarning kam quvvatli tiplari ishlab chiqarilmoqda.

Kundalik turmushimizda ishlatiladigan avtomat va yarim avtomat kiryuvish mashinalari ("EVRIKA-3M") barabanlarini yuritish uchun mo'ljallangan ikki tezlikli kondensatorli asinxron motor ishlab

chiqarilmoqda (P_{2N} = 120 va 60 W, U_N = 220 V, f = 50 Hz, n = 2850 va 425 ayl/min).

Chorvachilik, parrandachilik fermalarida va boshqa ishlab chiqarish obyektlarida qo'llaniladigan turli xil mashina hamda mexanizmlarni yuritish uchun 4AM100SU1 tipli uch fazali asinxron motorlar (P_{2N} = 2,2; 3; 4 va 5,5 kW, U_N = 380 V, η = 81; 82; 86,5 va 87,5 %) mo'ljallangan.

4AM100UZ tipli uch fazali asinxron motorlardan foydalanish qulay bo'lganligi sababli ular har xil dastgohlarda, kompressorlar, ventilatorlar hamda avtomat boshqarish sistemalarida keng qo'llaniladi. Ularning nominal kattaliklari xuddi 4AM100SU1 tipli motorniki singaridir.

To'qimachilik sanoatida ishlatiladigan TO-3 tipli (P_{2N} = 0,8 va 1,1 kW, U_N = 220/380 V, η = 75 %) uch fazali asinxron motorlari mokili avtomat va boshqa dastgohlarni yuritish uchun mo'ljallangan.

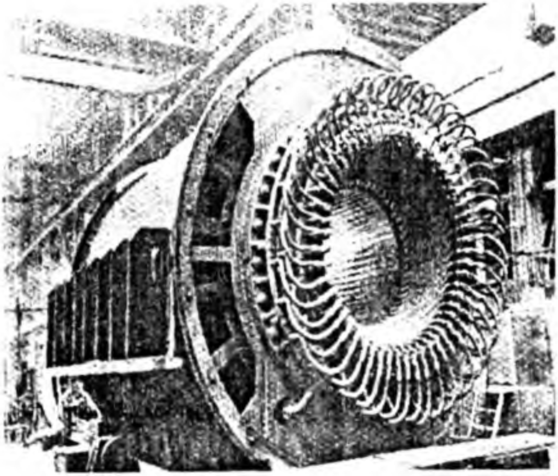
Nazorat savollari:

1. Asinxron mashinalarning maxsus turlari to'g'risida ma'lumot bering.

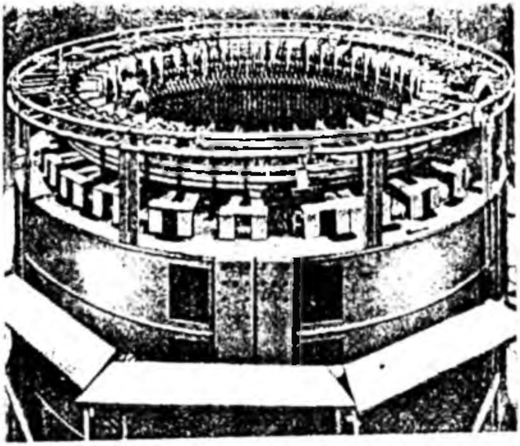
2. Asinxron motorlarni ishlatish jarayonida qanday nosozliklar bo'lishi mumkin?

3. Asinxron motorlarning zamonaviy turlari to'g'risida ma'lumot bering.

IV BO'LIM.
SINXRON MASHINALAR



IV.1-rasm. *Suv bilan sovitiladigan turbogenerator (TBB-500-2, 500 MW, 20 кV) statorining umumiy ko'rinishi («Elektrosila», Sankt-Peterburg, Rossiya).*



IV.2-rasm. *Suv bilan sovitiladigan gidrogenerator (190 MV·A, 375 ayl/min) statorining umumiy ko'rinishi («Broun–Boveri» firmasi, Shvetsariya).*

18-BOB. SINXRON MASHINALARNING KONSTRUKSIYALARI, ISHLASH PRINSIPI VA QO‘ZG‘ATISH SISTEMALARI

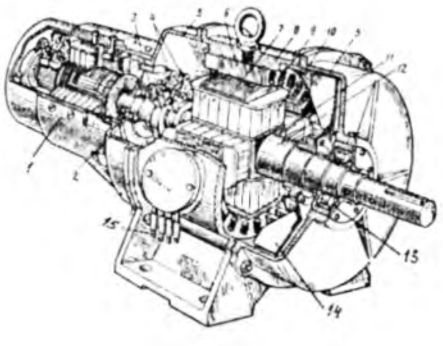
Statorda hosil bo‘lgan aylanma magnit maydonning aylanish chastotasi rotorning aylanish chastotasi bilan bir xil chastotada aylanadigan mashinaga *sinxron mashina* (SM) deyiladi.

Sinxron mashinalar motor, generator va kompensator rejimlarida ishlatilishi mumkin. Elektr stansiyalarda o‘zgaruvchan tok energiyasini sinxron generatorlar (turbogeneratorlar, gidrogeneratorlar) ishlab chiqaradi.

18.1. Sinxron mashinalarning konstruksiyasiga oid umumiy ma’lumot

Mazkur kitobning 10.1-bandida o‘zgaruvchan tok mashinalari aktiv qismlariga oid umumiy ma’lumot berilgan edi. Quyida kam quvvatli va yirik sinxron mashinalar konstruksiyalarining o‘ziga xos xususiyatlariga oid ma’lumot bilan tanishamiz.

Ayon qutbli kam quvvatli elektromagnit qo‘zg‘atgichli sinxron mashinaning tuzilishi 18.1-rasmda ko‘rsatilgan. Bunda rotorga tegishli asosiy qismlar: val (12), unga mahkamlab joylashtirilgan ostov, ya’ni rotor yarmosi (11), bunga o‘rnatilgan magnit qutblar, ya’ni qutb o‘zagi va qutb uchligi (7), o‘zakning tashqarisida qo‘zg‘atish chulg‘ami (10),



18.1-rasm. *Ayon qutbli kam quvvatli sinxron mashinaning tuzilishi: **1** — elektromagnit qo‘zg‘atgich; **2** — tayanch tagligi (podpyatnik); **3** — kontakt halqalar; **4** — cho‘tka tutqich va cho‘tkalar; **5** — podshipnik qalqoni; **6** — stator po‘lat o‘zagi; **7** — qutb uchligi; **8** — stanina; **9** — stator o‘zagi pazlari (chulg‘ami bilan); **10** — qutb (qo‘zg‘atish chulg‘ami bilan); **11** — rotor yarmosi (ostov); **12** —val; **13** — podshipnik; **14** — ventilator; **15** — stator chulg‘amining chiqish uchlari.*

mashinani sovitgich – ventilator (14) hamda mashinaning qo'zg'atgich tomoniga o'rnatilgan kontakt halqalar (3)dan iborat.

Katta quvvatli (yirik) sinxron mashinalarning ayrim qismlariga juda katta mexanik va elektromagnit yuklamalar kuchli ta'sir qiladi. Yuklamasining jadalligi bo'yicha bu mashinalar boshqa hamma elektr mashinalalaridan ustun turadilar. Shuning uchun ularda katta miqdorda issiqlik ajralib chiqishi tufayli ularni *jadallik bilan sovitish* talab qilinadi.

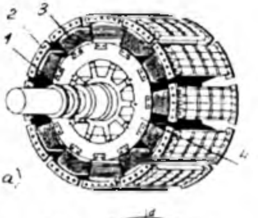
Yirik sinxron mashinalar konstruksiyasiga ko'ra turbogeneratorlar, gidrogeneratorlar, sinxron kompensatorlar va sinxron motorlarga bo'linadi.

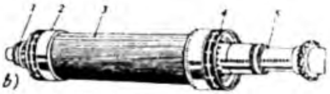
IV.1-rasmda turbogeneratorning IV.2-rasmda esa gidrogeneratorning, chulg'am o'tkazgichlari (ya'ni sterjenlari)ning ichidagi kanallardan distillangan suv o'tkazib sovitiladigan statorlarning umumiy ko'rinishi ko'rsatilgan.

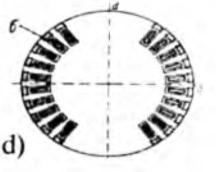
Turbogeneratorlarning rotorlari (18.2,*b*-rasm) oliy sifatli, bolg'alanib yasalgan, yaxlit (ya'ni quyma) po'latdan yasaladi; 18.2,*d*-rasmda noayon qutbli sinxron generator rotori (shu jumladan, qo'zg'atish chulg'ami)ning ko'ndalang kesimi ko'rsatilgan.

Eng katta quvvatli turbogenerator rotorining diametri (aylanish chastotasi n = 3000 ayl/min bo'lganda) markazdan qochirma kuchlarni cheklash maqsadida d_r=1,2÷1,25 m. dan oshmasligi, rotor tanasining uzunligi esa, valning egilishini cheklash maqsadida l_r = 7÷7,5 m. dan oshmasligi kerak. Rotor (ya'ni qo'zg'atish) chulg'amining tayyorlanishi sovitish sistemasiga bog'liq bo'ladi. To'g'ridan to'g'ri ichki sovitish sistemasida chulg'am o'tkazgichlarining ichida sovitish kanallari bo'lib, ulardan vodorod yoki distillangan suv o'tib issiqlik aktiv zonadan sovitish sistemasiga uzatiladi.

18.2-rasm. *Ayon qutbli; 4 – rotor yarmosi); noayon qutbli (**b**) (bunda: 1 – kontakt halqalar; 2 – qo'zg'atish chulg'amining bandaji, ya'ni kamari; 3 – rotor tanasi (yarmosi); 4 – ventilator; 5 – val) sinxron mashinalari rotorlarining umumiy ko'rinishi; noayon qutbli sinxron mashina rotorining ko'ndalang kesimi (**d**) (bunda: 6 – qo'zg'atish chulg'ami).*







d)

Issiqlik elektr stansiyalarida ***turbogeneratorlar*** o'rnatilgan bo'ladi va ular n = 3000 ayl/min (2p = 2) aylanish chastota bilan ishlagani uchun turbogeneratorning va bug' mashinasining gabariti va massasini ancha kamaytirishga imkon beradi.

Dunyoda eng katta quvvatli turbogenerator (1200 MW) "Elektrosila" OAJ da (Sankt-Peterburg, Rossiya) tayyorlanib, Kostroma issiqlik elektr stansiyasida ishlab turibdi.

Atom elektr stansiyalarida reaktorlar ishlab chiqargan bug'ning bosimi nisbatan kam bo'lganligidan, turbina va turbogeneratorlarning aylanish chastotasi n = 1500 ayl/min (2p = 4) qilib ishlatish tejamli hisoblanadi.

Quvvati 200 – 300 MW bo'lgan turbogeneratorlar texnik jihatdan eng takomillashgan, tejamli va ishonchli hisoblanadi.

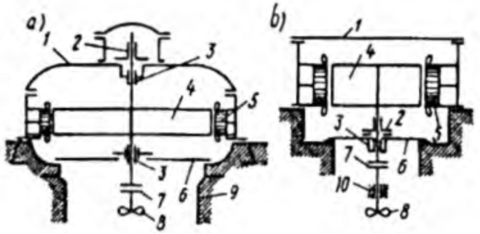
Stator va rotor chulg'amlarini ichidan suv bilan sovitishda turbogeneratorlarning eng katta quvvatini 2 mln. kW gacha oshirish imkoniyati bo'ladi, xolos. Bitta turbogeneratorning quvvatini yana ham oshirishni, faqat rotor chulg'amini tayyorlashda o'ta o'tkazuvchanlik materialidan foydalanganda erishish mumkin (bunday turbogeneratorni *krioturbogenerator* deyiladi). Bunda hozirgi ishlab turgan quvvatlardagi turbogeneratorlarning FIK ni oshirish va materiallar sarfini 2÷3 marta kamaytirish imkonini beradi.

Hozirgi vaqtda quvvati 100 MW gacha bo'lgan turbogeneratorlarni havo bilan sovitish sistemasi qo'llanila boshlandi, istiqbolda esa bunday sistemani quvvati 200 MW gacha bo'lgan turbogeneratorlarda qo'llash mumkinligi isbotlangan. Bu holda konstruksiya ancha oddiy bo'lib, turbogeneratorning tannarxi ham kamayadi.

Gidrogeneratorlarda rotorining aylanish chastotasi kam (n=50÷500 ayl/min) bo'lib, ularning katta quvvatlisi vertikal (tik) o'rnatiladigan qilib yasaladi. 18.3-rasmda bunday gidrogeneratorlarning osma va soyabon tiplarining konstruktiv sxemalari tasvirlangan.

Gidrogeneratorlarda stator va rotor chulg'amlari hamda stator po'lat o'zagi bevosita *distillangan suv* bilan sovitiladi. Agar bunday sovitish sistemasini xuddi shunday quvvatga ega bo'lib, tashqaridan (sirtidan) havo bilan sovitish sistemasi bilan solishtirilganda distillangan suv bilan sovitish sistemasida bir xil o'lchamdagi gidrogenerator quvvatini 2 marotaba oshirish mumkin.

Hozirgi vaqtda Sayano-Shushensk GES da (Rossiya) har bittasining quvvati 640 MW (720 MV·A) aylanish chastotasi n = 142,8 ayl/min bo'lgan gidrogeneratorlar ekspluatatsiya qilinmoqda. Uning tashqi



18.3-rasm. *Gidrogeneratorlarning konstruktiv sxemalari – osma (**a**) va soyabon (**b**) tiplari:*

1 *– ustki krestovina (ya'ni rotorni yuqoridan ko'targich);* ***2*** *– yonbosh tayanchi;* ***3*** *– yo'naltiruvchi podshipniklar;* ***4*** *– rotor;* ***5*** *– stator;* ***6*** *– pastki tayanch;* ***7*** *– val flanetsi (ya'ni turbina va generator vallarini birlashtiruvchi detal);* ***8*** *– turbina;* ***9*** *– fundament (asos);* ***10*** *– turbinaning yo'naltiruvchi podshipniklari.*

diametri taxminan 15 m, rotorining diametri 12 m, stator magnit o'tkazgichining uzunligi 2,75 m, qutblar soni 2p = 42.

Xitoyning Yanszi daryosida dunyoda eng katta GES qurilishi davom qilmoqda. Bunda har bittasining quvvati 700 MW bo'lgan 26 ta gidrogenerator qo'yiladi.

Sinxron motorlarning quvvati bir nechta o'nlab MW ga yetadi. Ularning aylanish chastotasi n = 100 ÷ 3000 ayl/min oraliqda bo'lib: aylanish chastotasi n ≤ 1500 ayl/ min. gacha bo'lganda ayon qutbli qilib, n ≥ 1500 ayl/ min bo'lganda esa noayon qutbli qilib tayyorlanadi.

Ayon qutbli sinxron mashina qutblarining po'lat o'zagi yupqa (*katta quvvatlida* qalinligi 1-2 mm bo'lgan konstruksion po'lat tunukasimon plastinalaridan, *kam quvvatlida* esa qalinligi 0,5-1 mm bo'lgan elektrotexnik po'lat plastinalaridan) yig'iladi. Ayon qutbli rotorning har qaysi qutb o'zagi tashqarisiga qo'zg'atish chulg'ami joylashtiriladi va ular ketma-ket ulanadi. Bu chulg'amlarning ikki uchi, valga mahkamlangan va undan izolatsiyalangan mis yoki latundan yasalgan kontakt halqalarga ulanadi. Mashinaning qo'zg'almas qismiga cho'tka tutqich orqali mahkamlangan cho'tkalar halqalarning sirtiga tegib kontakt hosil qiladi. Cho'tkalar simlar yordamida mashinaning tashqi klemmasiga ulanadi.

Qo'zg'atish chulg'ami (18.2,*a*-rasm), ya'ni induktorning uchlari I1 va I2 (yangi standart bo'yicha – F1 va F2 lotin) harflari bilan belgilanadi.

Sinxron mashinaning qutb uchligidagi pazlarga maxsus qisqa tutashgan chulg'am, ya'ni dempfer chulg'ami (18.2,*a*-rasm) joylashtiriladi. Bu chulg'am motor rejimida ishga tushirish, generator rejimida esa — tebranishlarni tinchlantirish (so'ndirish) vazifasini bajaradi.

Mashinada sinusoidal EYK olish uchun mashinaning havo oralig'ida magnit oqimi sinusoidaga yaqin shaklda tarqalgan bo'lishi kerak. Bunga erishish uchun *noayon qutbli sinxron mashinalarda* qo'zg'atish chulg'amini joylashtirishda yuqori garmonika MYK larning amplitudasi eng kam bo'lishiga intilinadi, ya'ni qo'zg'atish chulg'ami rotor po'lat o'zagi yuzasining taxminan 2/3 qismida tayyorlangan pazlarga taqsimlangan holda joylashtiriladi, qolgan 1/3 qismini esa "katta tish" hosil qiladi. *Ayon qutbli sinxron mashinalarda esa* qutb uchliklarining chetlaridagi havo oralig'i uning markazidagi havo oralig'iga nisbatan kattaroq qilib olinadi.

Yakor (stator) chulg'amida esa tarqalgan va qadami qisqartirilgan chulg'am ishlatiladi. Tokning 3-garmonikasini yo'qotish va mashinada quvvat isrofini kamaytirish maqsadida uch fazali generatorlarning yakor chulg'ami "yulduz" usulida ulanadi. Bunda liniya kuchlanishlarida ham 3-garmonikalar bo'lmaydi. Yuqoridagi tadbirlarni amalga oshirish yo'li bilan magnit oqimi va yakor chulg'amidan olinadigan EYK ning shakli deyarli sinusoidal bo'ladi.

18.2. Sinxron generatorning ishlash prinsipi va qo'zg'atish sistemasining turlari

Ishlash prinsipi. Sinxron generator(SG)da asosiy magnit maydon (oqim F_0) ni hosil qilish uchun uning qo'zg'atish chulg'amiga o'zgarmas tok beriladi. Bu tok vaqt bo'yicha o'zgarmas va qutbiyligi (ishorasi) almashlanadigan, rotorga nisbatan qo'zg'almas bo'lgan magnit maydonni hosil qiladi. Rotor (induktor) birlamchi mexanizm yordamida aylantirilganda, uning magnit maydoni qo'zg'almas stator (yakor) chulg'amiga nisbatan aylanadi va unda *elektromagnit induksiya qonuniga asosan*, o'zgaruvchan EYK hosil qiladi.

Agarda stator pazlarida simmetrik (ya'ni fazalarining magnit o'qlari fazoda 120° el. ga siljigan bo'lib, fazalarining elektr qarshiliklari va o'ramlar soni bir xil) uch fazali chulg'am joylashtirilgan bo'lsa, bu chulg'amda moduli bo'yicha teng va vaqt bo'yicha 120° el. ga siljigan EYK larning simmetrik sistemasi induksiyalanadi (hosil bo'ladi). Faza

chulg'amlarida induksiyalanadigan EYK larning chastotasi:

$$f_1 = pn / 60, \qquad (18.1)$$

bunda: p — chulg'amning juft qutblari soni; n — rotorning aylanish chastotasi, ayl./min.

Agar sinxron generatorning uch fazali yakor chulg'ami tashqi simmetrik yuklamaga ulansa, undan yakorning doiraviy aylanma magnit maydonini vujudga keltiruvchi simmetrik o'zgaruvchan toklar sistemasi o'tadi. Bu maydonning statorga nisbatan aylanish chastotasi

$$n_1 = 60 f_1 / p. \qquad (18.2)$$

Bunga (18.1) dan f_1 ning qiymatini qo'yib, $n_1 = n$ ekanligini aniqlaymiz. Demak, qo'zg'atish va yakor chulg'amlarining magnit maydonlari bir-biriga nisbatan qo'zg'almas bo'lib, mashinaning natijaviy magnit maydonini hosil qilar ekan.

Shu tariqa sinxron generator mexanik energiyani elektr energiyaga aylantiradi.

Qo'zg'atish sistemasi va uning turlari. Ko'pchilik elektr mashinalari elektromagnit qo'zg'atishli bo'lib, bunda qo'zg'atish magnit oqimi o'zgarmas tok manbayiga ulangan rotor chulg'ami tomonidan hosil qilinadi. Qo'zg'atish chulg'ami uchun o'zgarmas tok manbayi sifatida maxsus qo'zg'atish sistemasi ishlatilib, *unga bir necha muhim talablar qo'yiladi.* Ulardan asosiylari quyidagilardan iborat:

1) sinxron generatorning har xil ish rejimlarida qo'zg'atish tokining ishonchli va turg'un rostlanishi;

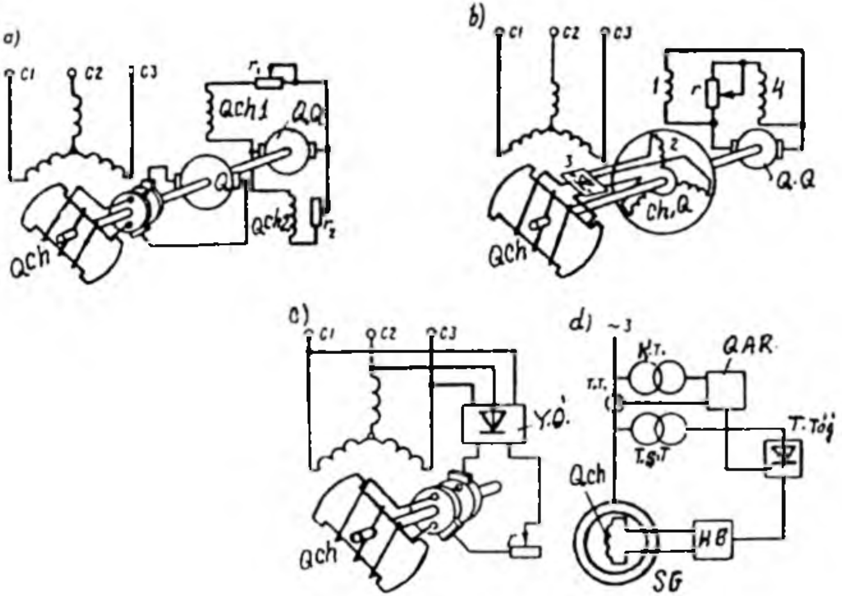
2) yetarli darajadagi tezkorlik, buning uchun qo'zg'atishni jadallashtirish qo'llaniladi, ya'ni qo'zg'atish kuchlanishini $U_{qo'z.N}$ nominal qiymatidan mumkin bo'lgan maksimal $1{,}8 \div 2{,}0\ U_{qo'z.N}$ qiymatigacha qisqa muddatda (uning o'sish jadalligi sekundiga 1,5-2 $U_{qo'z.N}$ bo'lishi) tezlik bilan oshirishni (bu tadbir avariya vaqtida va unga barham berishda sinxron generatorning turg'un ishini ta'minlash uchun qo'llaniladi) ta'minlashi;

3) magnit maydonining tezda so'nishi, ya'ni mashina chulg'amlaridagi kuchlanishi keskin oshmagan holda qo'zg'atish chulg'ami tokining nolgacha kamayishi (magnit maydonini so'ndirish zarurligi generatorni tarmoqdan ajratish va unda bo'ladigan avariya holatlarda paydo bo'ladi).

Sinxron mashinalarda bir necha qo'zg'atish sistemasi qo'llaniladi.

Sinxron mashinalarning ayrimlarida so'nggi vaqtlargacha *elektr-mashinali qo'zg'atish sistemasi* (18.4,*a*-rasm) ishlatilmoqda. Bunda

qo'zg'atish manbasi sifatida "qo'zg'atgich" deb ataluvchi maxsus mustaqil qo'zg'atishli o'zgarmas tok generatoridan foydalanildi. Qo'zg'atgichning yakori sinxron generatori validan aylanma harakatga keltirilib, uning yakor chulg'ami kontakt halqalari orqali sinxron generatorning qo'zg'atish chulg'ami bilan ulangan. Bunday sistemada sinxron mashinaning qo'zg'atish toki "qo'zg'atgich"ning qo'zg'atish



18.4-rasm. *Sinxron generatorlarni elektromagnit qo'zg'atishli:* ***a*** *— kontaktli sistemasi (bunda:* ***QCh*** *— SGning qo'zg'atish chulg'ami,* ***Q*** *— qo'zg'atgich,* ***QQ*** *— qo'zg'atgichning qo'zg'atgichi.* ***QCh1*** *va* r_1 *— qo'zg'atgichning qo'zg'atish chulg'ami va rostlash reostati,* ***QCh2*** *va* r_2 *— QQ ning qo'zg'atish chulg'ami va rostlash reostati) va* ***b*** *— kontaksiz (bunda:* ***ChQ*** — cho'tkasiz qo'zg'atgich va uning: ***1*** — qo'zg'atish va ***2*** — yakor chulg'amlari, ***3*** — yarim o'tkazgichli to'g'rilagich); ***d*** — o'z-o'zini qo'zg'atish prinsipiga oid chizma (*bunda*: ***YO'*** — yarimo'tkazgich; ***r*** — rostlash reostati); ***d*** — o'z-o'zini qo'zg'atish avtomatik sistemasining strukturali sxemasi (*bunda*: ***KT*** — kuchlanish transformatori, ***TT*** — tok transformatori, ***TST*** — to'g'rilagich sxemaning transformatori, ***QAR*** — qo'zg'atishni avtomatik rostlash qurilmasi, ***TTo'g'*** — tiristorli to'g'rilagich, ***HB*** — himoya bloki, ***SG*** — sinxron generator).

zanjiridagi reostat yordamida rostlanadi (o'zgartiriladi). Qo'zg'atgichning qo'zg'atilishi o'z-o'zini qo'zg'atish sxemasi (18.4,*d*-rasm) yoki mustaqil qo'zg'atish sistemali alohida o'zgarmas tok generatori ("qo'zg'atgichni qo'zg'atgich — QQ")dan amalga oshiriladi.

O'rta va katta quvvatli sinxron generatorlarda qo'zg'atish tokini rostlash jarayoni avtomatlashtirilgan bo'ladi (18.4,*e*-rasm) .

Katta quvvatli turbogeneratorlarda — ayrim holda qo'zg'atgich sifatida yuqori chastotali induktor tipidagi o'zgaruvchan tok generatorlari qo'llaniladi (18.4,*b*-rasm). Bunday generatorning chiqishida yarimo'tkazgichli to'g'rilagich ulangan bo'ladi.

Hozirgi vaqtda amalda *ventilli qo'zg'atish sistemalari* keng qo'llanilmoqda, chunki bu holda elektromagnit inersiyasi katta bo'lgan elektr-mashinali qo'zg'atish sistemasiga nisbatan qo'zg'atish tokini rostlash tezkorligi va, demak, ishonchlilik ancha oshadi.

Ventilli qo'zg'atish sistemasini uchta turga bo'ladilar: o'z-o'zini qo'zg'atishli, mustaqil qo'zg'atishli va cho'tkasiz qo'zg'atishli sistemalar.

Ventilli o'z-o'zini qo'zg'atish sistemada (18.4,*c*-rasm) qo'zg'atish chulg'ami, sinxron generator (masalan, gidrogenerator) yakor chulg'ami chiqishiga ulangan boshqariladigan statik to'g'rilagichdan o'zgarmas tok bilan ta'minlanadi. Bunga oid avtomatik sistemaning strukturali sxemasi 18.4,*e*-rasmda ko'rsatilgan. Sinxron generatorning boshlang'ich qo'zg'atilishi, uning qutblaridagi qoldiq magnitlanish tufayli yuzaga keladi.

Ventilli mustaqil qo'zg'atish sistemada, rotori bosh generator vali bilan ulangan, alohida uch fazali sinxron generator (qo'zg'atgich) yakoridan olingan o'zgaruvchan tok, statik to'g'rilagichda o'zgarmas tokka aylantirilib kontakt halqalar orqali qo'zg'atish chulg'amiga beriladi.

Cho'tkasiz qo'zg'atish sistemasi (18.4,*b*-rasm) ventilli mustaqil qo'zg'atish sistemaning bir turidir. Faqat bu holda qo'zg'atgich vazifasini konstruksiyasi almashtirilgan, ya'ni o'zgarmas tok mashinaning konstruksiyasi singari, rotorda — yakor, statorda esa induktor joylashtirilgan sinxron generator bajaradi. Qo'zg'atgichning yakor chulg'ami asosiy generatorning qo'zg'atish chulg'ami bilan generator valida joylashtirilgan aylanuvchi to'g'rilagich orqali ulanadi. Bu holda sirpanish kontaktidan foydalanishga zarurat qolmaydi va qo'zg'atish sistemasining ishonchliligi hamda mashinaning FIK oshadi.

Zamonaviy sinxron motorlarni qo'zg'atish uchun o'zgaruvchan tok

tarmog'iga ulanadigan va motorning har turli rejimlarida qo'zg'atish tokini avtomatik boshqarishni amalga oshiradigan ***tiristorli qo'zg'atgich qurilmalari*** qo'llaniladi. Bunday qo'zg'atish usuli eng ishonchli va tejamlidir, chunki tiristorli qo'zg'atgich qurilmalarining FIK o'zgarmas tok generatorlarnikidan yuqoridir.

Sinxron motorlarning zamonaviy seriyalarida TE-320/48 (qo'zg'atish kuchlanishi $U_{qo'z}$ = 48 V) va TE8-320/75 (qo'zg'atish kuchlanishi $U_{qo'z}$=75 V) tipli tiristorli qo'zg'atgich qurilmalari keng qo'llaniladi.

Qo'zg'atishga sarflanadigan quvvat, odatda, mashina foydali quvvatining 0,2÷ 5% ni tashkil qiladi (kam qiymatlar katta quvvatli mashinalarga oid). Quvvati bir necha kW gacha bo'lgan sinxron mashinalarda qo'zg'atishni *doimiy magnit* yordamida amalga oshiriladi (bu holda qo'zg'atish chulg'ami bo'lmaydi).

Nazorat savollari:

1. Sinxron mashinalar konstruksiyasining o'ziga xos xususiyatlari nimadan iborat?

2. Sinxron mashinada dempfer chulg'ami qayerda joylashtiriladi va uning vazifasi nimadan iborat?

3. Sinxron mashinalar qo'zg'atish sistemasining qanday turlari mavjud?

4. Cho'tkasiz qo'zg'atish sistemasining afzalligi nimadan iborat?

19-BOB. SINXRON GENERATORNING SIMMETRIK YUKLAMA BILAN ISHLASHI VA YAKOR REAKSIYASI

19.1. Sinxron generatorning simmetrik yuklama bilan ishlashidagi elektromagnit jarayonlar

SG statorining har bir faza chulg'amlariga qiymatlari simmetrik yuklama ulansa, chulg'amlardan bir-biriga nisbatan 120° ga siljigan uch fazali toklar o'tadi. Bu toklar statorda $n_1 = n$ aylanish chastota bilan aylanadigan magnit maydonni hosil qiladi. Yuklama toki yakor magnit oqimi F_a ni hosil qiladi. F_a va qo'zg'atish chulg'amining magnit oqimi F_0 bir-biriga nisbatan qo'zg'almas bo'lib, bu oqimlar birgalikda mashinaning natijaviy magnit oqimini hosil qiladi.

Umuman, yuklama bilan ishlayotgan generatorda natijaviy magnit oqimi Φ_{nat} qo'zg'atish chulg'amining MYK F_0 va yakorning MYK F_a lari ta'siri natijasida hosil bo'ladi. MYK F_0 yuklamaga bog'liq bo'lmaydi, Φ_a esa yuklamaning qiymatiga va xarakteriga bog'liq bo'ladi. Yuklamaning xarakteri deganda yakor MYK ning asosiy magnit oqimga qanday burchak ostida ($\Psi = 0°$; $0° < \Psi \leq +90°$; $0° > \Psi \leq -90°$) ta'sir qilishini tushunish lozim. Shuning uchun ham generatorning natijaviy oqimi Φ_{nat} salt ishlash rejimidagi oqim Φ_0 dan farq qiladi.

Yakor MYK F_a ning asosiy magnit oqimi $\Phi_0 = \Phi_{qo'z}$ ga ta'siri ***yakor reaksiyasi*** deyiladi. Sinxron mashinalarda yakor reaksiyasi yuklama qiymatiga va xarakteriga bog'liq bo'ladi. Quyida noayon va ayon qutbli sinxron mashinalar uchun yakor reaksiyasini ko'rib chiqamiz.

Noayon qutbli sinxron generator magnit sistemasining to'yinishi hisobga olinmagan hol uchun yakor reaksiyasi. Bunday SM da stator va rotor orasidagi havo oralig'ida stator aylanasi bo'yicha bir xil bo'ladi. Shunday bo'lgani uchun mashinaning *magnit zanjiri to'yinmagan bo'lsa*, natijaviy magnit oqim $\underline{\Phi}_{nat}$ ni aniqlash ancha osonlashadi, ya'ni u $\underline{\Phi}_0$ va $\underline{\Phi}_a$ magnit oqimlarining geometrik yig'indisiga teng bo'ladi:

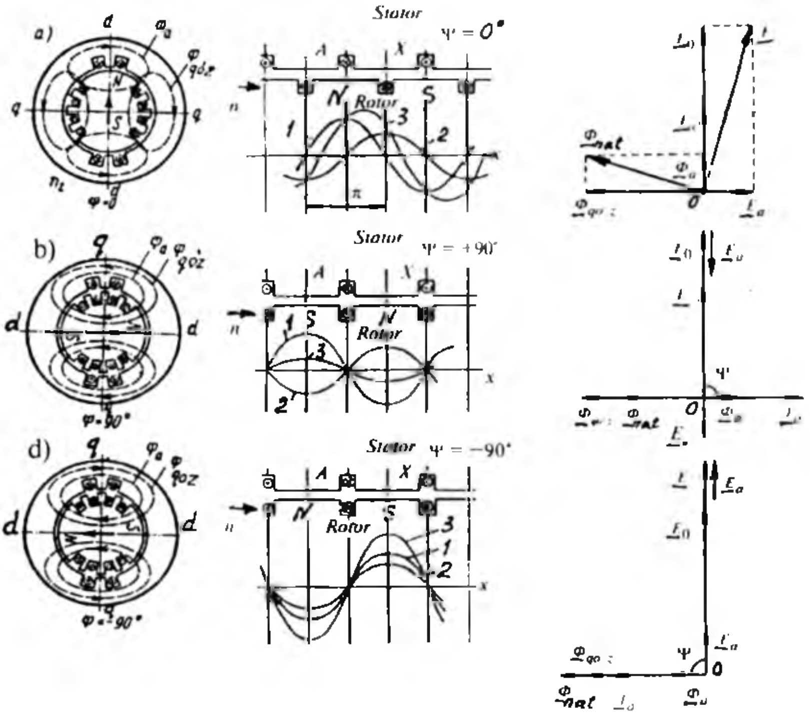
$$\underline{\Phi}_{nat} = \underline{\Phi}_0 + \underline{\Phi}_a. \qquad (19.1)$$

Yakor reaksiyasining SM ish xossalariga ta'sirini EYK E_0 va yakor toki I_a orasidagi siljish burchagi ψning har xil qiymatlarida ko'rib chiqamiz.

Burchakning qiymati yuklama qarshiliklari xarakteriga (aktiv, induktiv, sig'imiy yoki aralash bo'lishiga) bog'liq bo'ladi.

Agar yuklama faqat aktiv qarshilikdan iborat bo'lsa ($\psi = 0$), AX fazadagi tok o'zining maksimum qiymatiga, rotorning N va S

qutblarining o‘qi ko‘rilayotgan chulg‘amning o‘rta paziga to‘g‘ri kelganda erishadi (19.1,*a*-rasm). Bunda Φ_a oqim AX fazaning o‘qi bilan mos tushadi yoki Φ_0 oqimga nisbatan 90 el. gradusga orqada bo‘ladi. Elektr gradus ikki qutbli mashinalarda geometrik gradusga teng, p >2 bo‘lganda esa 1 geom. grad = p el. grad. bo‘ladi.



19.1-rasm. *Noayon qutbli sinxron mashinada turli (**a** — aktiv, **b** — induktiv va c — sig‘imiy) xarakterli yuklamadagi magnit oqimlar ($\Phi_{qo'z}$ — qo‘zg‘atish oqimi va Φ_a — yakor reaksiyasi oqimi), magnit induksiyalari (**1** — qo‘zg‘atish chulg‘ami induksiyasi $B_{qo'z}$, 2 — yakor chulg‘ami induksiyasi B_a va 3 — natijaviy induksiya B_{nat}) ning taqsimlanish egri chiziqlari hamda vagnit oqimlar va EYKlarning vektor diagrammalari; Φ_{nat} — natijaviy oqim.*

SM lar nazariyasida N va S qutblar o‘rtasidan o‘tadigan o‘q ***bo‘ylama o‘q deyiladi*** va d-d bilan belgilanadi, qo‘shni qutblar orasidan o‘tadigan

o'q esa ***ko'ndalang o'q deyiladi*** va q-q bilan belgilandi. Shunday qilib, SG ning yuklamasi faqat aktiv xarakterli ($\psi = 0$) bo'lsa, yakorning magnit oqimi mashinaning ko'ndalang o'qi bo'yicha ta'sir qiladi. Bunda har bir qutb o'qining bir tomoni magnitlansa, ikkinchi tomoni esa magnitsizlanadi.

Natijaviy magnit oqim vektorining moduli $\Phi_{nat} = \sqrt{\Phi_0^2 + \Phi_a^2}$ bilan aniqlanadi.

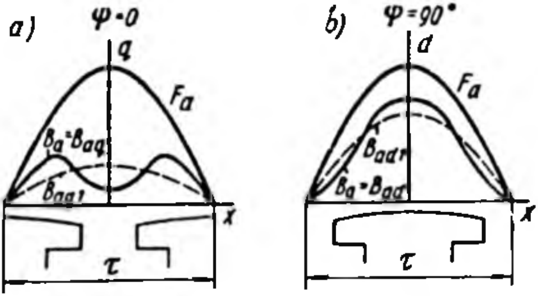
Agar yuklama faqat induktiv xarakterli ($\psi = 90°$) bo'lsa (19.1,*b*-rasm), AX fazadagi tok o'zining maksimum qiymatiga EYK E_0 ning qiymatiga nisbatan chorak davr (90°) keyinroq erishadi.

Yakor magnit oqimi Φ_a mashinaning bo'ylama o'qi bo'yicha F_0 oqimga teskari yo'nalib, bunda $\underline{\Phi}_{nat} = \underline{\Phi}_0 + (-\underline{\Phi}_a)$ bo'ladi va uning qiymati kamayadi. Bu esa yakor EYK E_a ning kamayishiga olib keladi. Shunday qilib, yuklama faqat *induktiv xarakterda* bo'lsa, yakor reaksiyasi mashinaning bo'ylama o'qi bo'yicha ***magnitsizlovchi ta'sir*** ko'rsatar ekan.

Agar yuklama faqat *sig'im xarakteriga* ($\psi = -90^0$) ega bo'lsa (19.1,*d*-rasm), yakorning magnit oqimi Φ_j qo'zg'atish chulg'ami oqimi Φ_0 ning yo'nalishi bilan bir xil bo'lib mashinaning bo'ylama o'qi bo'yicha magnitlovchi ta'sir qiladi. Bu esa, natijaviy magnit oqim $\underline{\Phi}_{nat} = \underline{\Phi}_0 + \underline{\Phi}_a$ ni va EYK E_a ni oshiradi.

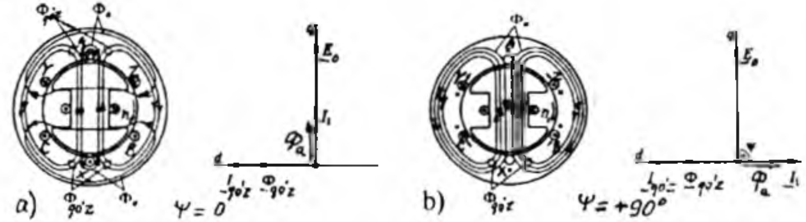
Amalda SG ning yuklamasi aralash xarakterli bo'ladi. Bunda EYK E_0 va yakor toki $\underline{I}_j$ orasidagi siljish burchagining qiymati $\pi/2 > \Psi > 0$ va $-\pi/2 > \Psi < 0$ oralig'ida bo'ladi. Bunda aktiv-induktiv yuklama (orqada qoluvchi tok)da yakor reaksiyasi mashinaga magnitsizlovchi, aktiv-sig'imiy yuklama (oldinda keluvchi tok)da esa yakor reaksiyasi mashinaga magnitlovchi ta'sir ko'rsatadi. Aralash xarakterdagi yuqlamada tokning aktiv tashkil etuvchisi esa mashinaning ko'ndalang o'qi bo'yicha magnitsizlaydi.

Ayon qutbli sinxron generator magnit sistemasining to'yinishi hisobga olinmagan hol uchun yakor reaksiyasining o'ziga xos xususiyatlari. *Ikki reaksiya usuli.* Ayon qutbli mashinada stator va rotor orasidagi havo oralig'i har xil bo'ladi, bu oraliq qutb uchliklari chetida uning o'rtasiga nisbatan katta bo'ladi

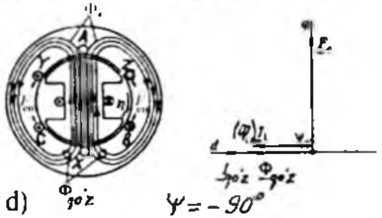


19.2-rasm. *Ayon qutbli sinxron mashinaning ko'ndalang (**a**) va bo'ylama (**b**) o'qlari bo'yicha yakor MYK larining hamda ular hosil qilgan magnit induksiyalarining taqsimlanish egri chiziqlari.*

va qo'shni qutblar oralig'ida kattalashib ketadi. Shuning uchun yakor magnit oqimi Φ_a faqat yakor MYK F_a ning qiymatiga emas, balki rotor qutblariga nisbatan MYK F_a ning tarqalish egri chizig'i $F_a = f(x)$ ning holatiga ham bog'liq bo'ladi.



19.3-rasm. *Ayon qutbli sinxron generatorning: **a** – aktiv (y = 0°), **b** – induktiv (y=+90°) va **d** – sig'imiy (y=–90°) xarakterli yuklamalardagi yakor reaksiyasi va vektor diagrammalari.*



Masalan, agar $\Psi = 0$ bo'lsa, MYK F_a sinusoidal tarqalgan bo'lsa ham, yakor magnit induksiyasining tarqalish egri chizig'i egarsimon shaklda bo'ladi (19.2,*a*-rasm).

Agar $\Psi = 90°$ bo'lsa, yakorning magnit oqimi Φ_a mashinaning bo'ylama o'qi bo'yicha yo'naladi(19.2,*b*-rasm) va magnit

induksiyasining egri chizig'i *d-d* o'qqa nisbatan simmetrik bo'ladi. Bu o'q bo'yicha havo oralig'ining magnit qarshiligi nisbatan kichik bo'lgani uchun, magnit induksiyasining qiymati $\Psi = 0$ dagi induksiyaga nisbatan katta bo'ladi. Shu sababli induksiyalarning birinchi garmonikalari B_{ad1} va B_{aq1} ham turlicha maksimal qiymatlarga ega bo'ladi (19.2-rasm).

19.3-rasmda ayon qutbli sinxron generatorning qo'zg'atish chulg'ami va yuklamaning xarakteri: ***a*** – aktiv ($\psi = 0°$), ***b*** – induktiv ($\psi = +90°$) va ***s*** – sig'imiy ($\psi = -90°$) bo'lgandagi yakor chulg'ami magnit oqimlarining o'zaro yo'nalishlari va ularga tegishli vektor diagrammalari ko'rsatilgan.

Yuklamaning xarakteri aktiv bo'lganda (19.3,*a*-rasm) A fazada tok va EYK lar bir vaqtning o'zida maksimumga erishadi. Bu holda yakor tokining magnit maydoni ko'ndalang o'q bo'yicha yo'nalib yakorning qutb tagiga kirib kelayotgan qismini kuchsizlantiradi, qutb tagidan chiqib ketayotgan qismini esa kuchaytiradi. Mashinaning magnit zanjiri to'yingan bo'lganligidan natijaviy magnit oqim nisbatan kamayadi. Burchak $\psi = 0°$ bo'lganda stator chulg'amidan o'tadigan toklar hosil qilgan elektromagnit kuchlar rotorning aylanish yo'nalishi bilan mos tushadi. Bunda rotorga miqdor jihatdan teng va qarama-qarshi yo'nalgan (tormozlovchi elektromagnit momentini hosil qiluvchi) kuchlar ta'sir qiladi. Bu momentni muvozanatlash uchun generator valini aylantiruvchi birlamchi mexanizm (turbina)ning mexanik momenti oshirilishi zarur.

Induktiv xarakterli yuklamada yakor tokining vektori $\underline{I}_1$ EYK vektori $\underline{E}_0$ dan ψ = pp/2 burchakka orqada qoladi. Rotorning 19.3,*a*-rasmda ko'rsatilgan holatidagi paytga mos keluvchi EYK larning yo'nalishi o'tkazgichlar yonida "x" va nuqta "·" belgilari orqali belgilangan. Qutblar o'qida joylashgan A faza o'tkazgichlarida induksiyalangan EYK ning qiymati maksimal qiymatga erishadi (qo'zg'atish induksiyasi maksimal bo'lganda).

Yakorning magnit maydoni (oqimi) $\underline{\Phi}_a$ yakor toki $\underline{I}_a$ yo'nalishi bilan mos tushib qo'zg'atish maydon $\underline{\Phi}_{qo'z}$ ga qarshi yo'naladi va uni kuchsizlantiradi. Demak, $\psi = +90°$ da yakor reaksiyasi magnitsizlovchi ta'sir ko'rsatib, natijaviy magnit oqim va uning yaqor chulg'amida hosil qilgan EYK salt ishlash rejimidagiga nisbatan kam bo'ladi.

19.3,*b*-rasm bo'yicha chap qo'l qoidasidan foydalanib yakor chulg'ami o'tkazgichlariga ta'sir etadigan kuch *f* aniqlansa, yakor chulg'amiga ta'sir etuvchi kuchlar yig'indisi nolga teng bo'lishi kelib

chiqadi. Demak, sinxron generator yuklamasi induktiv xarakterli bo'lganda uning elektromagnit momenti nolga teng bo'lar ekan.

Sinxron generator yuklamasi sig'imiy ($\psi = -90°$) xarakterli bo'lganda ham (19.3,*d*-rasm) uning elektromagnit momenti nol bo'ladi, chunki yuklamaning xarakteri sof induktiv yoki sof sig'imiy bo'lgan hollarda yakor toki faqat reaktiv tashkil etuvchidan iborat bo'ladi.

Ayon qutbli SM larda havo oralig'ining natijaviy qarshiligi o'zgarib turishi sababli, mashinaning ish xossalarini tahlil qilishda ***ikki reaksiya usuli*** qo'llaniladi. Bu usulga asosan yakorning MYK F_a ikkita tashkil etuvchidan iborat bo'ladi (19.4-rasm), ya'ni:

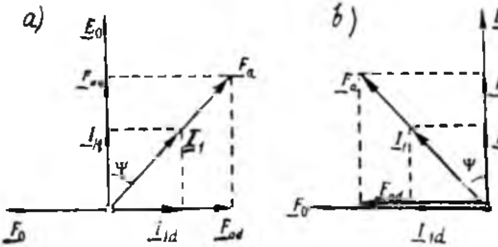
bo'ylama ta'sir etuvchisi

$$F_{ad} = F_a \sin\psi \qquad (19.2)$$

va ko'ndalang ta'sir etuvchisi

$$F_{aq} = F_a \cos\psi . \qquad (19.3)$$

Bunda yakorning MYK $\underline{F}_a = \underline{F}_{ad} + \underline{F}_{aq}$ bo'ladi. Yakorning bo'ylama tashkil etuvchi MYK $\underline{F}_{ad}$ yakorning bo'ylama magnit oqimi



19.4-rasm. *Ayon qutbli sinxron mashinaning aktiv-induktiv (**a**) va aktiv-sig'imiy (**b**) xarakterli yuklamada yakor toki va MYK ning bo'ylama va ko'ndalang tashkil etuvchilari.*

$\underline{Ф}_{ad}$ ni, yakor MYK ning ko'ndalang tashkil etuvchisi $\underline{F}_{aq}$ esa yakorning ko'ndalang magnit oqimi $\underline{Ф}_{aq}$ ni hosil qiladi. $\underline{Ф}_{ad}$ va $\underline{Ф}_{aq}$ oqimlar o'zlaridan 90° orqada qoladigan yo'nalishda (o'qda) yakor chulg'amining bo'ylama $\underline{E}_{ad}$ va ko'ndalang $\underline{E}_{aq}$ EYK larini hosil qiladi.

Agar generatorning yuklamasi aktiv-induktiv xarakterli bo'lsa, $\underline{F}_a$ vektor $\underline{E}_0$ dan $0 < \Psi < 90°$ burchakka keyinda bo'ladi (19.4,*a*-rasm), aktiv-sig'imiy xarakterli bo'lganda esa, $\underline{F}_a$ vektor EYK vektori $\underline{E}_0$ dan $0 < \Psi < 90°$ burchakka oldinda bo'ladi (19.4,*b*-rasm).

Shunday qilib, ayon qutbli SG da yuklama xarakteri aktiv-induktiv bo'lsa — yakor reaksiyasi magnitsizlovchi ta'sir ko'rsatib, aktiv-sig'imiy bo'lganda esa — magnitlovchi ta'sir ko'rsatar ekan.

Ayon qutbli mashinalarda qo'shni magnit qutblari oralig'ining magnit qarshiligi qutb uchliklari bilan stator orasidagi oraliqning magnit qarshiligidan katta bo'ladi. Shuning uchun ayon qutbli sinxron generatorlarda yakor magnit oqimining ko'ndalang tashkil etuvchi qismi noayon qutbli mashinanikiga nisbatan ancha kichik bo'ladi. Shu sababli, MYK ning kamayishini hisobga oladigan maxsus koeffitsient kiritiladi:

$$F_{aq} = \kappa_q F_{aq} = \kappa_q F_a \cos\psi \;, \qquad (19.4)$$

bu yerda: k_q — yakor ko'ndalang reaksiyasining ta'sirini hisobga oluvchi koeffitsient. Odatda, bu koeffitsient $k_q = 0{,}30 \div 0{,}65$ ga teng bo'ladi.

Shuningdek, ayon qutbli sinxron mashina MYK ning bo'ylama yo'nalgan qismini topish tenglamasiga k_d koeffitsienti kiritiladi:

$$F_{ad} = \kappa_d \cdot F_{ad} = \kappa_d F_a \sin\psi \;, \qquad (19.5)$$

bu yerda k_d — yakor bo'ylama reaksiyasining ta'sirini hisobga oluvchi koeffitsient. Odatda, $k_d = 0{,}80 \div 0{,}95$ ga teng.

19.2. Sinxron generator EYK larining muvozanat tenglamalari va vektor diagrammalari

SG salt ishlaganda uning tashqi klemmalaridagi kuchlanish stator chulg'amida hosil bo'lgan EYK ga teng bo'ladi. Agarda SG ga yuklama ulangan bo'lsa, yakor reaksiya tarqoq magnit oqimi ta'siridan va statordagi kuchlanish pasayishi natijasida klemmalardagi kuchlanish EYK dan kichik bo'ladi.

Quyida noayon va ayon qutbli SG larda hosil bo'ladigan EYK larni ko'rib o'tamiz.

Noayon qutbli SG yakor chulg'amida hosil bo'ladigan EYK lar tarkibiga quyidagilar kiradi:

1) asosiy magnit oqim $\underline{\Phi}_0$ hosil qilgan EYK E_0.

2) yakor chulg'amining MYK F_a yakorning magnit oqimi $\underline{\Phi}_a$ ni vujudga keltiradi. Bu oqim, o'z navbatida, yakor chulg'amida o'zinduksiya EYK E_a ni hosil qiladi:

$$E_a = -jI_1 \cdot x_a \,, \qquad (19.6)$$

bu yerda x_a — yakor chulg'amining induktiv qarshiligi;

3) tarqoq magnit oqimi $\Phi_{\sigma 1}$ hosil qilgan EYK $E_{\sigma 1}$:

$$E_{1\sigma} = -jI_1 \cdot x_{1\sigma}, \tag{19.7}$$

bunda $x_{1\sigma}$ – yakor chulg'amining tarqoq induktiv qarshiligi;

4) Φ_a va $\Phi_{\sigma 1}$ magnit oqimlari yakor toki tomonidan hosil qilingani tufayli x_a va $x_{\sigma 1}$ induktiv qarshiliklarni qo'shish mumkin: $x_a + x_{\sigma 1} = x_s$ (bu yerda: x_s – noayon qutbli SM ning sinxron induktiv qarshiligi yoki to'la induktiv qarshilik deyiladi). U holda

$$\underline{E}_s = -j\underline{I}_1 x_a + (-j\underline{I}_1 x_{\sigma 1}) = -j\underline{I}_1 x_s. \tag{19.8}$$

5) Stator chulg'ami aktiv qarshiligida kuchlanish pasayishi:

$$\underline{U}_{r1} = \underline{I}_1 \cdot r_1. \tag{19.9}$$

Noayon qutbli SG ning kuchlanishi yuqoridagi EYK larning vektor yig'indisidan iborat bo'ladi:

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_0 + \underline{E}_s - \underline{U}_{r1}$$

yoki

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_0 - j\underline{I}_1 x_s - \underline{I}_1 r_1. \tag{19.10}$$

SM larning turli xil ish rejimlarini tahlil qilishda vektor diagrammalaridan keng foydalaniladi.

Vektor diagrammani ikkita yo'l bilan qurish mumkin.

SG *ning magnit to'yinishi hisobga olinmagan hol uchun vektor diagrammani qurishda* quyidagi kattaliklar, ya'ni:

1) salt ishlashdagi EYK E_0 ning qiymati;

2) yuklama toki $\underline{I}_1$ ning qiymati va bu vektor bilan EYK $\underline{E}_0$ lar orasidagi siljish burchagi – ψ;

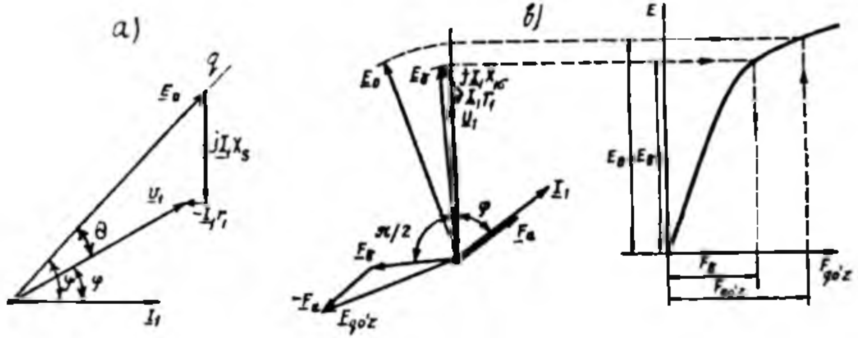
3) stator fazaviy chulg'amining sinxron reaktiv x_s va aktiv r_1 qarshiliklari ma'lum bo'lganda kuchlanish $\underline{U}_1$ ni aniqlash.

SG *ning magnit to'yinishi hisobga olingan hol uchun vektor diagrammani qurishda* esa yuqoridagilarga qo'shimcha holda stator chulg'amining o'ramlar soni w_1 va mashinaning salt ishlash xarakteristikasi ham ma'lum bo'lishi kerak.

Noayon qutbli sinxron generatorning vektor diagrammalari.

(19.10) tenglamadan foydalanib noayon qutbli SG ning vektor diagrammasini qurishda SG ning salt ishlashidagi qo'zg'atish chulg'amining magnit oqimi mashinaning ko'ndalang o'qi q da hosil

qilgan EYK vektori $\underline{E}_0$ ni ixtiyoriy yo'nalishda qo'yishdan boshlanadi.



19.5-rasm. *Noayon qutbli SG ning aktiv-induktiv xarakterli yuklamadagi vektor diagrammalari:* ***a*** *— magnit zanjirining to'yinishi hisobga olinmagan hol uchun;* ***b*** *— magnit zanjirining to'yinish darajasi hisobga olingan hol uchun; Ed_{dd} — natijaviy magnit oqim F_{nat} ning mashina bo'ylama o'qi bo'yicha tashkil etuvchisi Fd_{dd} hosil qilgan EYK.*

Stator toki $\underline{I}_a$ vektori esa yuklamaning xarakteriga qarab EYK $\underline{E}_0$ dan orqada (aktiv-induktiv yuklamada 19.4,*a*-rasm) yoki oldinda (aktiv-sig'imiy yuklamada 19.4,*b*-rasm) chiziladi. EYK $\underline{E}_0$ vektori oxiridan $\underline{I}_1$ vektorga tik yo'nalishda $\underline{E}_s$ vektori chiziladi. Statorning aktiv qarshiligida kuchlanish pasayishi vektori $\underline{U}_{r1}$ tok vektori $\underline{I}_1$ ga parallel, yo'nalishi esa unga teskari qilib chiziladi (chunki formulada uning ishorasi "minus"). $\underline{U}_{r1}$ vektorning uchini θ nuqta bilan birlashtirib kuchlanish vektori $\underline{U}_1$ hosil qilinadi.

EYK $\underline{E}_0$ vektori bilan kuchlanish $\underline{U}_1$ vektori orasidagi burchak θ — *yuklama burchagi* deyiladi. SM generator sifatida ishlaganda kuchlanish $\underline{U}_1$ doimo EYK $\underline{E}_0$ dan θ burchakka orqada bo'ladi. Bunda θ burchakning ishorasi musbat bo'ladi deb qabul qilingan va generatorning yuklamasi oshishi bilan, u ham oshadi.

Magnit zanjirining to'yinishi hisobga olingan hol uchun noayon qutbli SG ning vektor diagrammasini qurish tartibi. Bunda kuchlanish $\underline{U}_1$, stator chulg'amidan o'tuvchi yuklama toki $\underline{I}_1$ va ular orasidagi burchak φ (buni quvvat koeffitsienti cosφ orqali aniqlash mumkin); yakor (stator) chulg'amining: o'ramlar soni w_1, induktiv qarshiligi x_a,

tarqoq induktiv qarshiligi $x_{\sigma s}$ (yoki $x_a + x_{\sigma s} = x_s$), aktiv qarshiligi r_1 lar hamda SG ning salt ishlash xarakteristikasi ma'lum bo'lganda qo'zg'atish MYK $F_{qo'z}$ va u hosil qilgan EYK $\underline{E}_0$ aniqlanadi.

Noayon qutbli SG ning *aktiv-induktiv xarakterli yuklama uchun vektor diagrammasini qurish quyidagicha amalga oshiriladi.* Vertikal yo'nalishda kuchlanish vektori $\underline{U}_1$ qo'yiladi. Yuklama aktiv-induktiv bo'lgani uchun tok vektori $\underline{I}_1$ kuchlanish vektori $\underline{U}_1$ dan φ burchakka orqada qoladi. So'ngra $\underline{U}_1$ vektori uchidan $\underline{I}_1$ vektoriga parallel qilib stator chulg'ami aktiv qarshiligidagi $\underline{I}_1 r_1$ vektori, tok $\underline{I}_1$ vektoridan 90° oldin keluvchi $j\underline{I}_1 x_1 s_s$ vektori qo'yiladi va uning uchini 0 nuqta bilan birlashtirib EYK vektori $\underline{E}_\delta$ hosil qilinadi.

Yuklama ulangan mashina havo oralig'idagi magnit oqim F_δ ni qo'zg'atish chulg'ami MYK $\underline{F}_{qo'z}$ va yakor chulg'ami MYK $\underline{F}_a$ larning geometrik yig'indisiga teng bo'lgan natijaviy MYK $\underline{F}_\delta$ hosil qiladi. F_δ oqim yakor chulg'amida EYK E_δ ni hosil qiladi. Natijaviy MYK uchun quyidagi tenglamani yozish mumkin:

$$\underline{F}_\delta = \underline{F}_{qo'z} + \underline{F}_a; \qquad (19.11)$$

bu yerda $\underline{F}_a$ va $\underline{F}_{qo'z}$ – mazkur MYK larning 1-garmonikalari:

$$\underline{F}_a = 1{,}35\ (\omega\ k_{w1}/p)\ I_1;\ \underline{F}_{qo'z} = (4/\pi)\cdot(\sin\alpha\ /\alpha)\ I_{qo'z}\cdot w_{qo'z}. \qquad (19.12)$$

Mashinaning berilgan ish rejimi uchun $\underline{F}_\delta$ ning qiymati $\underline{E}_\delta$ bo'yicha salt ishlash xarakteristikasi – $E = f(\underline{F}_{qo'z})$ dan aniqlanadi (19.5-rasm):

$$E_\delta = \underline{U}_1 + j\ \underline{I}_1 x_1 s_s + \underline{I}_1 r_1. \qquad (19.13)$$

Magnit isroflar hisobga olinmaganda tok $\underline{I}_1$ vujudga keltirgan MYK $\underline{F}_a$ ham shu yo'nalishda chiziladi. MYK $\underline{F}_\delta$ EYK $\underline{E}_\delta$ dan 90° oldin keladi. (19.11) dan $\underline{F}_{qo'z} = \underline{F}_\delta - \underline{F}_a$ bo'lgani uchun, u 19.5-rasmda ko'rsatilgandek grafik yo'l bilan aniqlanadi. So'ngra salt ishlash xarakteristikadan MYK $\underline{F}_{qo'z}$ ga to'g'ri keladigan EYK $\underline{E}_0$ topiladi va vektor diagrammada MYK $\underline{F}_{qo'z}$ dan 90° orqada qoladigan yo'nalishda chiziladi.

Ayon qutbli sinxron mashinalarda $x_q < x_d$ bo'ladi.

Ayon qutbli SG da hosil bo'ladigan EYK lar tarkibiga quyidagilar kiradi:

1) qo'zg'atish chulg'ami MYK $\underline{F}_0$ asosiy magnit oqimi $\underline{F}_0$ ni, bu

oqim esa asosiy EYK $\underline{E}_0$ ni hosil qiladi;

2) yakor chulg'ami MYK ning bo'ylama o'q bo'yicha tashkil etuvchisi $\underline{F}_{ad}$ yakor reaksiyasi magnit oqimining shu o'q bo'yicha tashkil etuvchisi $\underline{F}_{ad}$ ni hosil qiladi. Bu magnit oqim stator chulg'amida o'zidan 90° orqada qoladigan yakor reaksiyasi o'zinduksiya EYK ning bo'ylama tashkil etuvchisi $\underline{E}_{ad}$ ni induksiyalaydi:

$$\underline{E}_{ad} = -j\underline{I}_{1d} \cdot x_{ad}\,, \tag{19.14}$$

bu yerda: $I_{1d} = I_a \sin\Psi$ – stator tokining bo'ylama o'q bo'yicha tashkil etuvchisi; x_{ad} – stator chulg'amining mashina bo'ylama o'qi bo'yicha induktiv qarshiligi (bu qarshilik mashinaning bo'ylama o'qi bo'yicha yakor reaksiyasiga ekvivalent bo'ladi);

3) yakor chulg'ami MYK ning ko'ndalang o'q bo'yicha tashkil etuvchisi $\underline{F}_{aq}$ yakor reaksiyasi magnit oqimining shu o'q bo'yicha tashkil etuvchisi $\underline{F}_{aq}$ ni hosil qiladi. Bu magnit oqim stator chulg'amida o'zidan 90° orqada qoladigan yakor reaksiyasi o'zinduksiya EYK ning ko'ndalang o'q bo'yicha tashkil etuvchisi $\underline{E}_{aq}$ ni hosil qiladi:

$$\underline{E}_{aq} = -j\underline{I}_{1q} \cdot x_{aq}\,, \tag{19.15}$$

bu yerda: $I_{1q} = I_a \cos\Psi$ – stator tokining ko'ndalang o'q bo'yicha tashkil etuvchisi; x_{aq} – stator chulg'amining mashina ko'ndalang o'qi bo'yicha induktiv qarshiligi (bu qarshilik mashinaning bo'ylama o'qi bo'yicha yakor reaksiyasiga ekvivalent bo'ladi);

4) stator po'lat o'zagi va qisman havo oralig'i orqali ilashgan tarqoq magnit oqimi $F_{\sigma 1}$ stator chulg'amlarida tarqoq EYK $E_{\sigma 1}$ ni hosil qiladi:

$$\underline{E}_{\sigma 1} = -j\underline{I}_a \cdot x_{\sigma 1}\,, \tag{19.16}$$

bu yerda: $x_{\sigma 1}$ – stator chulg'amining tarqoq magnit oqimi hosil qilgan induktiv qarshilik;

5) stator chulg'amining aktiv qarshiligida kuchlanish pasayishi:

$$\underline{U}_{r1} = \underline{I}_a \cdot r_1\,, \tag{19.17}$$

bu yerda: r_1 – stator chulg'ami aktiv qarshiligi; I_a – stator chulg'amining toki;

Shunday qilib, stator chulg'amidagi kuchlanish yuqoridagi EYK larning geometrik yig'indisi bilan ifodalanadi:

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_0 + \underline{E}_{ad} + \underline{E}_{aq} + \underline{E}_{\sigma 1} - \underline{U}_{r1}$$

yoki

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_0 - j\underline{I}_d x_{ad} - j\underline{I}_q x_{aq} - \underline{I}_1 x_{\sigma 1} - \underline{I}_1 r_1 . \qquad (19.18)$$

Ayon qutbli SG ning vektor diagrammalari. Ayon qutbli SG ning vektor diagrammlasi (19.18) tenglamaga asosida quriladi. Diagrammani qurish uchun yuqoridagi noayon qutbli SG da keltirilgan ma'lumotlardan tashqari, yakor reaksiyasining sinxron induktiv qarshiligi o'rniga mashinaning bo'ylama va ko'ndalang o'qlari bo'yicha tegishlicha x_{ad} va x_{aq} induktiv qarshiliklari ma'lum bo'lishi kerak.

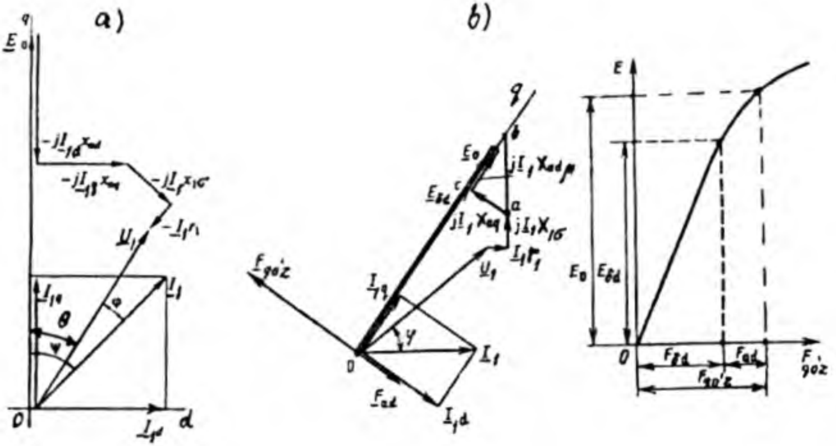
SG ning fazaviy toklari bir xil bo'lganda, vektor diagramma faqat bir faza uchun quriladi. Diagrammani qurishni qo'zg'atish chulg'ami hosil qilgan magnit oqimi F_0 ni biror yo'nalish bo'yicha (masalan, absissalar o'qi bo'yicha) yo'naltirishdan boshlaymiz. Stator chulg'amida hosil bo'lgan EYK $\underline{E}_0$ vektori magnit oqimi $\underline{F}$ dan 90° orqada chiziladi. Stator tokining $\underline{I}_1$ vektori yuklama xarakteriga qarab $\underline{E}_0$ vektoridan ψ burchakka oldinda yoki orqada bo'lgan yo'nalishda chiziladi. Agar yuklama aktiv-induktiv (aralash) xarakterli bo'lsa, stator toki $\underline{I}_1$ vektori EYK $\underline{E}_0$ vektoridan ψ burchakka orqada (19.6,*a*-rasm), aktiv-sig'imiy xarakterlida esa, $\underline{I}_1$ tok EYK $\underline{E}_0$ vektoridan ψ burchakka oldinda keladigan qilib chiziladi.

Yuklama toki $\underline{I}_1$ bo'ylama $\underline{I}_d = \underline{I}_1 \sin\psi$ va ko'ndalang $\underline{I}_q = \underline{I}_1 \cos\psi$ tashkil etuvchilarga ajratiladi, bunda $\underline{I}_q$ EYK vektori $\underline{E}_0$ bilan bir fazada, tokning bo'ylama tashkil etuvchisi $\underline{I}_d$ esa EYK $\underline{E}_0$ vektoridan aktiv-induktiv yuklamada 90° orqada, aktiv-sig'imiy yuklamada esa 90° oldinda chiziladi.

Aktiv-induktiv yuklamada $\underline{E}_{ad}$ vektori $\underline{E}_0$ vektorga teskari yo'nalishda, $\underline{E}_{aq}$ esa $\underline{E}_0$ vektoridan 90° orqada bo'lgan yo'nalishda chiziladi. Tarqoq oqim tufayli hosil bo'lgan EYK vektori $\underline{E}_{\sigma 1}$ tok vektori $\underline{I}_1$ dan 90° orqada chiziladi.

Stator chulg'ami aktiv qarshiligidagi kuch lanish pasayishi tok vektori $\underline{I}_1$ ga nisbatan teskari chiziladi (chunki uning ishorasi minus). 0 nuqtani $\underline{I}_1 r_1$ vektor uchi bilan tutashtirib, stator chulg'ami kuchlanish $\underline{U}_1$ ni topamiz.

Agar generator yuklamasi *aktiv-sig'imiy xarakterli bo'lsa* (19.4,*b*-rasm), $\underline{I}_1$ vektori EYK $\underline{E}_0$ dan ψ burchakka oldinda keladi. Magnit oqimi $\underline{\Phi}_{ad}$ ning yo'nalishi $\underline{\Phi}_0$ vektori yo'nalishi bo'yicha bo'ladi, ya'ni *yakor reaksiyasi magnitlovchi ta'sir ko'rsatadi*. Shu sababli aktiv-sig'imiy



19.6-rasm. *Ayon qutbli SG ning aktiv—induktiv xarakterli yuklama uchun vektor diagrammalari:* ***a*** *— magnit zanjirining to'yinishi hisobga olinmagan hol uchun;* ***b*** *— magnit zanjirining to'yinishi hisobga olingan hol uchun;* $E_{\delta d}$ *— natijaviy magnit oqim* Φ_{nat} *ning bo'ylama o'q bo'yicha tashkil etuvchisi* $\Phi_{\delta d}$ *hosil qilgan EYK.*

xarakterli yuklama uchun vektor diagramma qurilganda $\underline{E}_{ad} = -j\underline{I}_{d} \cdot x_{ad}$ vektorining yo'nalishi 19.6,*a*-rasmdagi diagrammaga nisbatan 180° ga o'zgaradi, ya'ni $\underline{E}_0$ vektori yo'nalishida qo'yiladi. Vektor diagrammaning qolgan qismini qurish yuqoridagi usulda amalga oshiriladi (bu vektor diagramma kitobda keltirilmagan).

Shunday qilib, SG ning yuklamasi induktiv va aktiv-induktiv xarakterda bo'lsa, yakor reaksiyasi mashinaning magnit zanjirini magnitsizlaydi, yuklama sig'imiy va aktiv-sig'imiy xarakterda bo'lganda esa, yakor reaksiyasi mashinaning magnit zanjiriga magnitlovchi ta'sir ko'rsatadi.

Magnit zanjirining to'yinishi hisobga olingan hol uchun ayon qutbli SG ning vektor diagrammasini qurish quyidagi tartibda amalga oshiriladi. Buning uchun (19.18) tenglamaga asoslanamiz va unga x_{ad} va x_{aq} larning o'rniga ularning mashina magnit zanjirining to'yingan holatidagi $x_{ad}m_m$ va $x_{aq}m_m$ qiymatlari qo'yiladi. Lekin ayon qutbli mashinada magnit zanjirining aniq to'yinish darajasini hisobga olish murakkabdir, chunki magnit to'yinishli mashinada ko'ndalang va

bo'ylama o'qlari bo'yicha magnit oqimlar (Φ_q va Φ_d) o'zaro bir-biriga ta'sir qiladilar[1]. Shuning uchun x_{ad} ning qiymati faqat mashinaning bo'ylama o'qi bo'yicha magnit oqimi Φ_d ga bog'liq bo'lib qolmasdan uning ko'ndalang o'qi bo'yicha magnit oqimi Φ_q ga ham bog'liq bo'ladi.

Ayon qutbli sinxron generator magnit zanjirining to'yinishini hisobga olingan hol uchun vektor diagrammasini amaliy qurish magnit to'yinishi hisobga olinmagan hol uchun qurilgan vektor diagrammaga (19.6,*a*-rasm) o'xshatib quriladi, lekin yakor reaksiyasi induktiv qarshiliklarining qiymatlari magnit to'yinishiga mos bo'lishi lozim. (19.6-rasmda mashinaning magnit to'yinishi faqat bo'ylama o'qi bo'yicha hisobga olingan hol uchun qurilgan, chunki mashinaning bu o'qi bo'yicha magnit to'yinish darajasi katta bo'ladi.)

Vektor diagrammani kuchlanish vektori $\underline{U}_1$ ni ixtiyoriy yo'nalishda chizishdan boshlanadi; yuklamaning xarakteri aktiv-induktiv bo'lgani uchun tok vektori I_1 φ burchakka orqada qoladi. So'ngra kuchlanishga $\underline{I}_1 r_1$ va $j\underline{I}_1 x_{1\sigma}$ kuchlanish pasayishi vektorlari qo'shiladi. Tok $\underline{I}_1$ ni bo'ylama va ko'ndalang o'qlar bo'yicha tashkil etuvchilari (I_d va I_q)ga ajratish uchun EYK $\underline{E}_0$ ning yo'nalishini, ya'ni mashina q o'qining tutgan o'rnini topish zarur bo'ladi. Buning uchun $j\underline{I}_1 x_{1\sigma}$ vektori davomiga qiymati $\underline{I}_1 x_{aq}$ (yoki $\underline{I}_1 x_{aq} m_m$) ga teng bo'lgan $\overline{ab}$ kesmani qo'yib uni 0 bilan birlashtirilsa $0b$ liniyada EYK $\underline{E}_0$ vektori yo'nalgan bo'ladi. Bu liniya bilan tok $\underline{I}_1$ orasidagi burchak ψ ga teng. $0b$ liniyaga *a* nuqtadan tushirilgan perpendikular $\underline{I}_1 x_{aq}$ (yoki $\underline{I}_1 x_{aq} m_m$) ga teng. $\overline{0c}$ kesma natijaviy EYK ning bo'ylama o'q bo'yicha tashkil etuvchisi $\underline{E}_{\delta d}$ ga teng. Bu EYK kattaligini salt ishlash xarkteristikasiga qo'yib MYK $F_{\delta d}$ (yoki tok $I_{\delta d}$) topiladi (19.6-rasm, *b*). Bo'ylama o'q bo'yicha yakor reaksiyasi MYK F_{ad} (yoki toki I_{ad}) ni yoki quyidagicha hisoblash yo'li bilan:

$$F_{ad} = k_d\, F_a \sin\psi;\ (\text{ yoki } I_{ad} = k_d\, F_a \sin\psi / w_{qo'z}), \qquad (19.19)$$

yoki tajribada olingan salt ishlash va qisqa tutashuv xarakteristikalaridan aniqlash mumkin.

Qo'zg'atish chulg'ami MYK $F_{qo'z}$ yoki unga mutanosib bo'lgan tok $I_{qo'z}$ ni, topilgan MYK $F_{\delta d}$ (yoki tok $I_{\delta d}$) lar bo'yicha quyidagi tenglama-

---

[1] *Ахматов М.Г., Салимов Д.С. Магнитные характеристики насыщенной явнополюсной синхронной машины продольно-поперечного возбуждения. Изд. АН УзССР, СТН, 1976, №2.*

larday hisoblash mumkin:

$\underline{F}_{qo'z} = \underline{F}_{\delta d} \pm \underline{F}_{ad}$ (yoki $I_{qo'z} = I_{\delta d} \pm I_{ad}$). (19.20)

(19.20) da "+" ishora – bo'ylama yakor reaksiyasi magnitlovchi bo'lsa (burchak $\psi < 0$) olinib, "–" ishora esa bo'ylama yakor reaksiyasi magnitsizlovchi ($\psi > 0$) bo'lganda olinadi. Aktiv-induktiv xarakterli yuklamada $\psi > 0$ bo'lgani uchun $\overline{F}_{\delta d}$ (yoki $\overline{I}_{\delta d}$) kesmaga $\overline{F}_{ad}$ (yoki $\overline{I}_{ad}$)ni qo'shib $\overline{F}_{qo'z}$ (yoki $\overline{I}_{qo'z}$) olinadi. Bu qiymatga salt ishlash xarakteristikasida EYK E_0 mos keladi. $E_0 - E_{ad}$ ayirma $\underline{I}_1 x_{ad\mu}$ ga teng.

Vektor diagrammadan kuchlanish o'zgarishi ΔU ni aniqlash mumkin, [%] :

$\Delta U_{\%} = 100 \cdot (E_0 - U_{1N}) / U_{1N}$.

Nazorat savollari:

1. Yakor reaksiyasi nima?

2. Ayon va noayon qutbli SG lardagi yakor reaksiyasi to'g'risida ma'lumot bering.

3. Ayon qutbli SG kuchlanishi va EYK larining muvozanat tenglamasini yozing.

4. Ayon qutbli SG ning vektor diagrammasi qanday quriladi?

20-BOB. UCH FAZALI SINXRON GENERATORNING AVTONOM REJIMDAGI XARAKTERISTIKALARI

SG ning ish xossalari uning xarakteristikalari bo'yicha baholanadi. Ish xossalariga oid xarakteristikalarni tajriba, hisoblash yoki vektor diagrammalar yordamida qurish mumkin. SG ning barqaror rejimi uchun muhimlaridan: salt ishlash, simmetrik qisqa tutashuv, induksion yuklanish, tashqi va rostlash xarakteristikalaridir.

20.1. Salt ishlash, simmetrik qisqa tutashuv va induksion yuklanish xarakteristikalari

Salt ishlash xarakteristikasi (SIX). Bu xarakteristika stator toki $I_1 = 0$ va rotor aylanish chastotasi $n = n_N = const$ bo'lganda SG ning chiqish klemmalaridagi kuchlanishi yoki EYK E_0 ning qo'zg'atish toki $I_{qo'z}$ ga bog'liq holda o'zgarishini ko'rsatadi, ya'ni $E_0 = f(I_{qo'z})$.

SG larning SIX hamda boshqa xarakteristikalarini nisbiy birliklarda qurish o'ng'aydir. Buning uchun kuchlanishning absolut qiymati $U_0 = E_0$ ni salt ishlashdagi nominal kuchlanish $U_0 = U_{1N}$ ga, qo'zg'atish tokining absolut qiymatini esa salt ishlashda nominal kuchlanish U_{1N} ga to'g'ri kelgan qiymati $I_{qo'z.N}$ ga bo'lib aniqlangan nisbiy biriliklardagi qiymatlari (U_{1*} va $I_{qo'z*}$) asosida SIX, ya'ni $U_{1*} = f(I_{qo'z*})$ quriladi (20.1-rasm, 1). $I_{qo'z*} = 0$ bo'lganda qutbning magnit o'zagidagi kam miqdordagi qoldiq magnit oqim ($\Phi_{qol} = 0{,}2 \div 0{,}3 \cdot \Phi_{0N}$) tufayli $as = E_{qol}$ vujudga keladi. Qo'zg'atish chulg'amidagi tokning qiymati kichik bo'lganda asosiy magnit oqimi kam bo'lib, mashinaning magnit zanjiri to'yinmagan bo'ladi. Shu sababli SIX ning boshlang'ich (*sd*) qismi to'g'ri chiziqli ko'rinishda bo'ladi. Qo'zg'atish toki ortib borgan sari magnit oqimi ortadi va mashinaning magnit zanjiri to'yina boradi. Bu holda SIX absissalar o'qiga og'gan ko'rinishda o'sib, magnit zanjiri to'la to'yinganda esa bu xarakteristika yana taxminan to'g'ri chiziqli ko'rinishga ega bo'ladi. SG ning nominal rejimi SIX egilgan qismining taxminan o'rtasiga to'g'ri keladi (20.1-rasm, 1 da "*c*" nuqta).

Bu xarakteristika yordamida SG ning magnit zanjiri to'yinish darajasini aniqlash mumkin. Buning uchun SIX ning to'g'ri chiziq (magnit zanjir to'yinmagan holdagi) qismi davom qildiriladi (20.1-rasm, 2) va $ab/av = k_{\mu}$ to'yinish koeffitsienti topiladi. Bu koeffitsient sinxron mashinalarda $k_{\mu} \approx 1{,}1 \div 1{,}4$ ga teng bo'ladi.

Odatda, nisbiy birliklarda ifodalangan SG larning SIX lari bir-

biridan kam farq qiladi va ularning o'rtacha qiymatiga mos keladigan xarakteristikani *normal salt ishlash xarakteristika* deyiladi. Ayon va noayon qutbli sinxron generatorlarning normal SIX lari 20.1-jadvalda keltirilgan.

Simmetrik qisqa tutashuv xarakteristikasi (QTX). Bu xarakteristikani tajribada olishda statorning fazaviy chulg'amlari qisqa tutashtirilib, rotorning aylanish chastotasi $n = n_N$ = const va $U_1 = 0$ bo'lganda stator chulg'amidagi qisqa tutashuv tokining qo'zg'atish tokiga bog'liqligini ko'rsatadi, ya'ni $I_{qt} = f(I_{qo'z})$.

20.1-jadval

Ayon va noayon qutbli sinxron generatorlarning normal salt ishlash xarakteristikalari

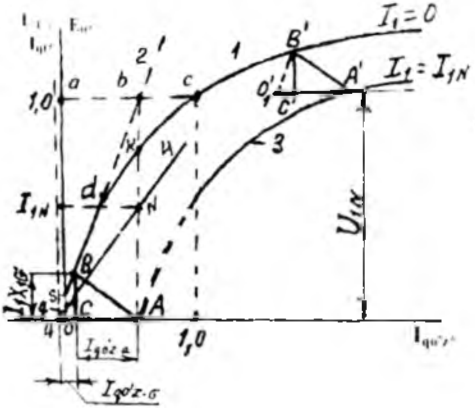
$I_{qo'z*}$		0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
E_{0*}	Noayon qutbli (*Turbogenerator*)	0	0.58	1.0	1.21	1.33	1.4	1.46	1.51
	Ayon qutbli (*Gidrogenerator*)	0	0.53	1.0	1.23	1.3	1.4	1.46	1.51

Qisqa tutashuv tajribasini olishda qo'zg'atish toki $I_{qo'z} = 0$ da qutb o'zagida mavjud bo'lgan kam miqdordagi qoldiq magnit oqim tufayli hosil bo'lgan qoldiq EYK E_{qol} = *0s* qisqa tutashuv toki I_{qt} = 0q ni vujudga keltiradi. Shu sababdan SG ning qisqa tutashuv xarakteristikasi ordinatalar o'qidagi "q" nuqtadan boshlanadi.

O'rta va katta quvvatli sinxron mashinalarda aktiv qarshilik juda ham kichik bo'lganidan uni e'tiborga olmaganda ($r_1 \approx 0$), yakor zanjirining qarshiligi sof induktiv bo'lib, qisqa tutashuv toki $I_{qt} = I_d$ mashinani bo'ylama o'qi bo'yicha magnitsizlovchi ta'sir qiladigan yakor reaksiyasi magnit oqimini hosil qiladi. Natijada mashinaning magnit zanjiri to'yinmagan bo'lganligidan QTX to'g'ri chiziq ko'rinishida bo'ladi (20.1-rasm, 4).

Induksion yuklanish xarakteristikasi (IYX). Bu xarakteristika $I_1 = I_{1N}$ = const, $\cos\varphi = 0$ va $f = f_N$ = const (ya'ni $n = n_N$ = const) bo'lganda $U_1 = f(I_{qo'z})$ bog'liqlikni xarakterlaydi.

SG ning induksion yuklanish xarakteristikasi yakor reaksiyasining bo'ylama o'q bo'yicha magnitsizlovchi ta'siri natijasida koordinata boshi



20.1-rasm. *Sinxron generatorning: 1 - salt ishlash xarakteristikasi (SIX) va 2 - uning boshlang'ich (magnit zanjiri to'yinmagan holatdagi, ya'ni to'g'ri chiziqli) qismini davom qildirib hosil qilingan SIX; 3- induksion yuklanish (IYX) va 4 - simmetrik qisqa tutashuv (QTX) xarakteristikalari.*

0 dan boshlanmay, balki absissalar o'qidagi birorta "A" nuqtadan boshlanadi. Bu nuqtani tajribada olishning iloji yo'q, chunki bu nuqtada $U_1 = 0$ bo'lgani uchun tok $I_1 = 0$ bo'ladi. Bu nuqtaning absissalar o'qidagi holatini SG ning qisqa tutashuv xarakteristikasi (QTX)dan nominal tokka to'g'ri kelgan qo'zg'atish toki $I_{qo'z.qt}$ ni aniqlab qo'yiladi. (*Izoh*: Qisqa tutashuv xarakteristikada ham yakor reaksiyasi induksion xarakteristikadagi kabi mashinaning bo'ylama o'qi bo'yicha magnitsizlovchi ta'sir qiladi).

SG ning induksion yuklanish xarakteristikasi (IYX), yakor reaksiyasining bo'ylama o'q bo'yicha magnitsizlovchi ta'siri (kam quvvatli sinxron generatorlarda yakor zanjiri aktiv qarshiligi r_1 ni ham e'tiborga olganda undagi kam miqdordagi kuchlanish tushishi) tufayli SIX dan pastroqda joylashadi (20.1-rasm, 2).

SG ning salt ishlash, yuklanish va qisqa tutashuv xarakteristikalari mashinaning parametrlari (induktiv qarshiliklari)ni aniqlashda muhim ahamiyatga egadir.

20.1-rasmda punktir chiziq bilan ko'rsatilgan qo'shimcha ordinatalar o'qi keyingi amaliy diagrammalarni qurishda zarur bo'ladi (bunda qoldiq magnit oqimining qiymati kichikligidan, u e'tiborga olinmaganda mashinaning salt ishlash xarakteristikasi koordinatalar boshidan boshlanib, amaliy diagramma qurish va uni tahlil qilish ancha osonlashadi).

20.2. Sinxron mashinalarning simmetrik barqaror rejimdagi parametrlari

Sinxron mashinaning simmetrik yuklamadagi barqaror rejimi parametrlariga stator va rotor chulg'amlarining aktiv va induktiv qarshiliklari kiradi.

Yakor chulg'ami fazasining (r_1), qo'zg'atish chulg'amining ($r_{qo'z}$) va dempfer (ya'ni tinchlantiruvchi) chulg'amining (r_D) aktiv qarshiliklari mazkur chulg'amlardagi elektr isroflari orqali aniqlanadi (masalan, yakor chulg'amida elektr isroflari $-$ $P'_e = m_1 I^2_1 r_1$ ma'lum bo'lsa r_1 ni aniqlash mumkin va hokazo).

Ayon qutbli sinxron mashinalarda dempfer chulg'amining aktiv qarshiligini mashinaning bo'ylama (r_{Dd}) va ko'ndalang (r_{Dd}) o'qlari bo'yicha aniqlanadi.

Ayon qutbli sinxron mashinaning barqaror rejimdagi induktiv qarshiliklariga mashinaning bo'ylama (x_d) va ko'ndalang (x_q) o'qlari bo'yicha induktiv qarshiliklari, hamda yakor chulg'ami fazasining tarqoq induktiv qarshiligi $x_{1\sigma}$ kiradi. Dempfer va qo'zg'atish chulg'amlarining tarqoq induktiv qarshiliklari sinxron mashinaning o'tish rejimlarida hisobga olinadi.

Noayon qutbli sinxron mashinada yakorning o'zaro induksiya qarshiligi x_1 (bu x_a ko'rinishida ham belgilanadi) quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$x_1 = 2\pi \cdot f \cdot L_1, \qquad (20.1)$$

bunda L_1 $-$ yakor chulg'amining induktivligi.

Noayon qutbli mashinalarda butun yakor aylanasi bo'yicha havo oralig'i bir xil bo'lgani uchun mashinaning bo'ylama va ko'ndalang o'qlari bo'yicha induktiv qarshiliklari bir xil bo'ladi, ya'ni $x_1 = x_d = x_q$.

Yakorning o'zaro induksiya maydoni yakor chulg'amida hosil qilgan EYK quyidagiga teng:

$$\underline{E}_a = -jx_1 \underline{I}_1. \qquad (20.2)$$

Mashinaning tarqoq induktiv qarshiligi tarqoq maydonning magnit qarshiliklari orqali aniqlanadi. Tarqoq oqim chulg'amning paz qismida va pazdan tashqari qismida qurshaladi. Tarqoq oqimga yuqori garmonikalar tomonidan hosil qilinadigan *differensial tarqoq oqim* ham ta'sir qiladi (bu oqimga magnit zanjirining to'yinishi darajasi ta'sir qiladi). Yirik mashinalarda differensial tarqoq oqim, odatda, fazaviy tarqoq oqimdan kichik bo'ladi. Mashina havo oralig'idagi maydon o'zgarishining shakli sinusoidadan qancha farq qilsa, differensial tarqoq oqim shuncha ko'p bo'ladi.

Tarqoq oqim hosil qilgan tarqoq EYK tok I_1 bilan quyidagicha bog'langan, ya'ni

$$E_{1\sigma} = -jx_{1\sigma} I_1. \qquad (20.3)$$

Noayon qutbli sinxron mashinaning to'la, ya'ni sinxron induktiv qarshiligi quyidagiga teng bo'ladi:

$$x_s = x_1 + x_{1\sigma}. \qquad (20.4)$$

Ayon qutbli sinxron mashinalarda bo'ylama o'qi bo'yicha havo oralig'i δ_{min} va ko'ndalang o'qi bo'yicha havo oralig'i δ_{max} bo'lgani uchun, bu o'qlar bo'yicha magnit qarshiliklar har xil bo'lib, mashinaning bo'ylama (x_d) va ko'ndalang (x_q) o'qlari bo'yicha induktiv qarshiliklari $x_d > x_q$ bo'ladi.

Mashinaning bo'ylama o'qi bo'yicha induktiv qarshiligi quyidagiga teng:

$$x_d = x_{ad} + x_{1\sigma}, \qquad (20.5)$$

bunda $x_{ad} = 2\pi f \cdot L_{ad}$ – mashinaning bo'ylama o'qi bo'yicha yakor reaksiyasining induktiv qarshiligi.

Mashinaning ko'ndalang o'qi bo'yicha induktiv qarshiligi quyidagiga teng:

$$x_q = x_{aq} + x_{1\sigma}, \qquad (20.6)$$

bunda $x_{aq} = 2\pi f \cdot L_{aq}$ – mashinaning ko'ndalang o'qi bo'yicha yakor reaksiyasining induktiv qarshiligi.

Yakor toki I_1 ning bo'ylama (I_{1d}) va ko'ndalang (I_q) o'qlari bo'yicha tashkil etuvchilari yakor chulg'amida hosil qilgan o'zinduksiya EYK lari quyidagiga teng bo'ladilar:

$$a)\ E_{ad} = -jx_{ad} I_d;\ b)\ E_{aq} = -jx_{aq} I_q \qquad (20.7)$$

O'zaro induksiya induktiv qarshiliklari magnit zanjirining to'yinishiga ko'p jihatdan bog'liq bo'ladi, tarqoq induktiv qarshiliklari esa magnit to'yinishga bog'liqligi nisbatan kam bo'ladi. Lekin qisqa tutashuvlarda tok nominalga nisbatan 10÷15 marotaba oshishi tufayli tarqoq oqim o'tadigan yo'llar to'yinadi va tarqoq induktiv qarshilik o'zgaradi.

Elektr mashinalari nazariyasida mashinaning parametrlarini aniqlashga katta e'tibor beriladi. Sinxron mashinalarning parametrlari mashinaning ekspluatatsion ko'rsatkichlarini aniqlash uchun muhim ahamiyatga ega bo'ladi.

Sinxron mashinaning induktiv qarshiliklarini tajribada aniqlash. Mashinaning bo'ylama o'qi bo'yicha induktiv qarshiligi x_d ni *salt ishlash va qisqa tutashuv* xarakteristikalaridan foydalanib aniqlash mumkin.

O'rta va katta quvvatli noayon qutbli sinxron mashinada stator chulg'ami aktiv qarshiligi r_1 ning qiymati ancha kichik ($r_1 = 0{,}01 \div 0{,}001$; $x_1 = 1{,}0 \div 2{,}5$) bo'lganligidan $r_1 \approx 0$ deb qabul qilinsa va qisqa tutashuv rejimida ($U_1 = 0$) yakor zanjiri qarshiligi sof induktiv bo'ladi va qisqa tutashuv toki $I_{qt} = I_d$ vujudga keltirgan yakor reaksiyasi oqimi mashinani magnitsizlaydi. Natijada mashinaning magnit zanjiri to'yinmagan bo'ladi.

Qisqa tutashuv rejimda ayon va noayon qutbli sinxron mashinalar uchun tegishlicha EYK lar muvozanat tenglamasidan

$$E_0 = jI_{qt}x_{ad} + jI_{qt}x_{1\sigma} = jI_{qt}x_d; \qquad (20.8)$$

$$E_0 = jI_{qt}x_a + jI_{qt}x_{1\sigma} = jI_{qt}x_s. \qquad (20.9)$$

ularning induktiv qarshiligini aniqlash mumkin.

(20.1) dan ayon qutbli SG ning magnit to'yinishi hisobga olinmagan hol uchun uning bo'ylama o'qi bo'yicha induktiv qarshiligi quyidagiga teng bo'ladi:

$$x_d = E_0 / I_{qt}. \qquad (20.10)$$

bundagi EYK E_0 va tok I_{qt} to'g'ri chiziqli salt ishlash (20.1-rasm, 2) va qisqa tutashuv (20.1-rasm, 4) xarakteristikalaridan bir xil qiymatli qo'zg'atish tokiga (masalan, $I_{qo'z} = \overline{0A}$ da $E_0 = \overline{Ab}$; $I_{qt} = I_{1N} = \overline{AN}$) to'g'ri kelishi kerak.

Sinxron mashinaning magnit zanjiri to'yinishi hisobga olinganda $x_d m_m$ induktiv qarshilik kamayadi. Shuning uchun EYK E_0 ning qiymatini real salt ishlash xarakteristikasidan (20.1-rasm, 2) olish kerak bo'ladi.

Agar sinxron mashinaning bo'ylama (k_d) va ko'ndalang (k_q) o'qlari bo'yicha stator (yakor) maydoni shaklining koeffitsientlari ma'lum bo'lsa, hisoblangan x_d dan foydalanib mashinaning ko'ndalang o'qi bo'yicha sinxron induktiv qarshiligi x_q quyidagicha aniqlanadi:

$$x_q = (k_q / k_d) x_d . \qquad (20.11)$$

Ayon qutbli SG larning x_d va x_q induktiv qarshiliklarini *sirpanish tajribasidan* ham aniqlash mumkin. Bu tajribada stator chulg'amidagi tok $I_1 = 0{,}25 I_{1N}$ ga teng bo'ladigan qilib pasaytirilgan kuchlanish beriladi va SG ning qo'zg'atish chulg'amiga tok berilmagan holda (bu chulg'amga voltmetr ulanadi) uning rotorini birlamchi motor bilan sinxron aylanish chastotadan kamroq bo'lgan aylanish chastota bilan magnit maydon aylanishi tomonga aylantiriladi. Bunda statorning fazaviy chulg'amlari hosil qilgan magnitlovchi kuchning o'qi goh

rotorning bo'ylama o'qi bilan, goho ko'ndalang o'qi bilan mos tushadi. Bo'ylama o'qi bilan mos tushganda yakor reaksiyasining magnit oqimi kichik magnit qarshilikka uchraydi, demak, MYK va uni vujudga keltiradigan stator toki minimal qiymatga ega bo'ladi (bu holda statordagi voltmetr maksimal kuchlanishni ko'rsatadi). Stator chulg'ami magnitlovchi kuchining o'qi rotorning ko'ndalang o'qiga mos tushganda yakor reaksiyasining magnit oqimi katta magnit qarshilikka uchrab, MYK va uni vujudga keltiradigan stator toki maksimal qiymatga ega bo'ladi (kuchlanish esa minimal bo'ladi).

Shunday qilib, kam miqdordagi sirpanish tajribasida stator chulg'amidagi tok I_{min} qiymatdan I_{max} gacha o'zgaradi. Bunda induksion regulatordagi kuchlanish tushishining o'zgarishi tufayli statorga berilgan kuchlanish U_{max} dan U_{min} gacha o'zgaradi.

Stator chulg'amidagi kam miqdordagi aktiv qarshilik e'tiborga olinmasa (r_1»"0) mashinaning bo'ylama va ko'ndalang o'qlari bo'yicha sinxron induktiv qarshiliklari stator fazaviy chulg'amlari yulduz ulangan hol uchun quyidagicha aniqlanadi:

$$x_d = U_{max} / (\sqrt{3}\, I_{min}) \ , \ x_q = U_{min} / (\sqrt{3}\, I_{max}). \qquad (20.12)$$

Bu tajribadan aniqlangan x_d va x_q larning qiymatlari mashina magnit zanjirining to'yinmagan holatiga to'g'ri keladi (bunda $x_q \approx 0{,}6\ x_d$).

Noayon qutbli sinxron mashinalarda yakor aylanasi bo'ylab havo oraliq bir xil bo'lgani tufayli $x_d = x_q = x_\sigma$ bo'ladi. (20.8) dan noayon qutbli SG ning magnit to'yinishi hisobga olinmagan hol uchun uning ko'ndalang o'qi bo'yicha induktiv qarshiligi quyidagiga teng bo'ladi:

$$x_\sigma = E_0 / I_{qt} \, . \qquad (20.13)$$

Induktiv qarshiliklar nisbiy birliklarda quyidagicha ifodalanadi:

$$x_{d*} = (I_{1N} / U_{1N}) \cdot x_d \ ; \ x_{q*} = (I_{1N} / U_{1N}) \cdot x_q \ . \qquad (20.14)$$

bunda I_{1N} va U_{1N} — fazaviy tok va kuchlanishlarning nominal qiymatlari.

O'rta va katta quvvatli zamonaviy turbogenerator va gidrogeneratorlarning simmetrik yuklamada barqaror rejimi uchun parametrlarining qiymatlari 20.2-jadvalda keltirilgan.

20.2-jadval

Turbogenerator va gidrogeneratorlarning parametrlari

Nomi	r_{a*}	x_{d*}	x_{q*}	x_{ad*}	x_{aq*}	$x_{1\sigma*}$
Noayon qutbli SM lar *(Turbogeneratorlar)*	0,002–0,008	1,6–2,2	1,6–2,2	1,5–2,1	1,5–2,1	0,08–0,25
Ayon qutbli SM lar *(Gidrogeneratorlar)*	0,002–0,02	0,6–1,8	0,4–1,2	0,5–1,5	0,3–0,9	0,1–0,3

Qisqa tutashuv nisbati (QTN). Bu sinxron mashinaning muhim parametrlaridan biri bo'lib, magnit to'yinishi hisobga olinmagan ayon qutbli sinxron mashina uchun to'g'ri chiziqli salt ishlash xarakteristikasida nominal kuchlanish ($E_0=U_N$)ga to'g'ri kelgan qo'zg'atish toki $I_{qo'z(0)N}$ ning (20.1-rasmda $\overline{0_1 A}=I_{qo'z.\sigma}+I_{qo'z.a}$) QTX da nominal tok ($I_q=I_{1N}$)ga to'g'ri kelgan qo'zg'atish toki $I_{qo'z(qt)N}$ ga nisbati orqali ifodalanadi, ya'ni

$$QTN = I_{qo'z(0)N} / I_{qo'z(qt)N} \, . \qquad (20.15)$$

Agar QTN real (magnit to'yinishli) SIX bo'yicha aniqlansa

$$(QTN)_n = 1,1 \div 1,2 / x_{d*} \, , \qquad (20.15,a)$$

bu yerda x_{d*} — yakorning bo'ylama induktiv qarshiligi.

Noyon qutbli sinxron mashina (turbogenerator)lar uchun QTN = =0,5÷1,0, ayon qutbli mashinalar uchun esa 0,8÷1,8.

QTN sinxron mashinaning ekspluatatsion xossalarini baholashda katta amaliy ahamiyatga ega: QTN kichik bo'lgan mashina parallel ishlashda turg'unligi nisbatan kam, chunki yuklama o'zgarishida vujudga keladigan kuchlanish tebranishlari anchagina bo'ladi, lekin bunday mashinalarning gabaritlari kichik, demak, QTN katta bo'lgan sinxron mashinaga nisbatan arzon bo'ladi.

Tarqoq induktiv qarshilik x_{1a} ni aniqlash. Buning uchun sinxron generatorning SIX, QTX va induksion yuklanish xarakteristikalaridan foydalaniladi. (20.1-rasm, 4) da A nuqta qisqa tutashuv rejimiga (I_{qt} = I_{1N} da U_1 = 0 ga) mos keladi. Bundagi ABC uchburchak *reaktiv* yoki *xarakteristik* uchburchak deyiladi: uning gorizontal kateti $\overline{CA}$ yakor

reaksiyasining magnitsizlovchi ta'siri F_{adN} ni kompensatsiyalaydigan qo'zg'atish tokining qiymati $I_{qo'z.a}$ ga, uchburchakning vertikal kateti $\overline{BC}$ esa – nominal tokdagi kuchlanish pasayishi $I_{1N}x_{1\sigma}$ ni kompensatsiyalash uchun zarur bo'lgan EYK ga teng. Demak, agar SG ning bo'ylama induktiv qarshiligi x_{ad} ma'lum bo'lsa 20.1-rasmdagi A nuqta (tok I_{q1} = $=I_{1N}$)da stator chulg'amidagi EYK ning quyidagi

$$\underline{E}_{qt} = -j\underline{I}_{1N}x_d = \underline{E}_{1d} + \underline{E}_{1\sigma} = -j\underline{I}_{1N}x_{ad} + (-j\underline{I}_{1N}x_{1\sigma}) \qquad (20.16)$$

muvozanat tenglamasidan foydalanib tarqoq induktiv qarshilik $x_{1\sigma}$ nisbiy birliklarda quyidagiga teng bo'ladi:

$$x_{1\sigma*} = x_{d*} - x_{ad*} \qquad (20.17)$$

Reaktiv uchburchakni qurish. Buning uchun tarqoq induktiv qarshiligi $x_{1\sigma}$ da tok I_{1N} hosil qilgan $jI_{1N}x_{1\sigma}$ kuchlanish pasayishi qiymatini ordinatalar o'qiga qo'yib, uni SIX ga ko'chiriladi (rasmda B nuqta) va undan absissalar o'qiga perpendikular tushirib C nuqta hosil qilinadi. Bundagi $\overline{0_1C}$ kesma mazkur kuchlanish pasayishini muvozanatlovchi EYK ni hosil qiluvchi qo'zg'atish tokining ulushi ($I_{qo'z.\sigma}$) ga teng. "B" nuqtani "A" nuqta bilan birlashtirib *reaktiv uchburchak* hosil qilinadi

SG ning SIX va induksion yuklanish xarakteristikasi hamda reaktiv uchburchak yordamida induksion yuklanish xarakteristikasining nominal kuchlanishga to'g'ri keladigan tarqoq induktiv qarshilikning qiymati aniqlanadi. Buning uchun $\overline{0_1A} = \overline{0_1'A'}$ kesmani induksion yuklanish xarakteristikasida kuchlanish U_{1N} ga to'g'ri kelgan nuqta A' ga qo'yiladi va $0'_1$ nuqtadan SIX ning to'g'ri chiziqli qismiga parallel qilib real SIX bilan kesishguncha $\overline{0_1'B'}$ yordamchi chiziq o'tkazib V' nuqtadan $\overline{0_1'A'}$ kesmaga perpendikular tushiriladi, hosil bo'lgan kesma esa $\overline{B'C''}$ = $I_{1N}x_{1\sigma}$ ga teng. Bundan $x_{1\sigma}$ aniqlanadi:

$$x_{1\sigma} = x_p = \overline{B'C''} / I_{1N}. \qquad (20.18)$$

Bu usul bilan aniqlangan induktiv qarshilik (buni *Pote induktiv qarshiligi* x_p deyiladi) tarqoq magnit oqim hosil kilgan induktiv qarshilikka nisbatan biroz kattaroq bo'ladi.

Reaktiv uchburchak ABC ni qurishdagi mashina magnit zanjirining to'yinish darajasi induksion yuklanish xarakteristikasida kuchlanish U_N ga to'g'ri kelgan A' nuqtasidagiga nisbatan har xil bo'lgani tufayli reaktiv uchburchak yordami bilan aniqlangan tarqoq induktiv qarshilik (rasmda

$B'C' = I_{1N} \cdot x_{1\sigma}$) oldingiga nisbatan kattaroq bo'ladi.

Noayon qutbli sinxron mashinalarda $x_p \approx (1,05 \div 1,1) x_{1\sigma}$, ayon qutbli sinxron mashinalarda esa $x_p \approx (1,1 \div 1,3) x_{1\sigma}$.

20.3. Tashqi va rostlash xarakteristikalari

Tashqi xarakteristikalari. Bu xarakteristikalar qo'zg'atish toki $I_{qo'z}$ = const, f = const (demak, aylanish chastotasi $n = n_N$ = const) va cosφ =const bo'lganda generatorning chiqish klemmalaridagi kuchlanish U_1 ning yuklama toki I_1 ga bog'liq holda o'zgarishini ko'rsatadi, ya'ni $U_1 = f(I_1)$.

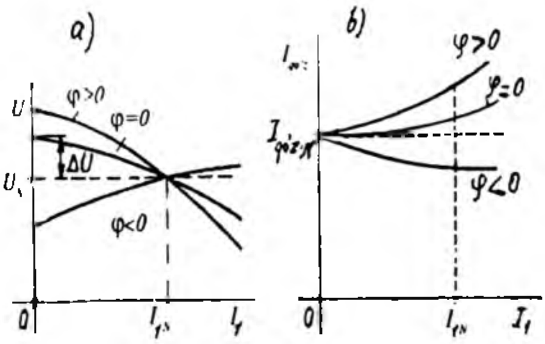
SG ning tashqi xarakteristikalari yuklamaning xarakteriga qarab har xil bo'ladi. 20.2-rasmda generatorning bu xarakteristikalari uch xil (aktiv, aktiv-induktiv va aktiv-sig'imiy) xarakterli yuklamalarga tegishli cosφ uchun ko'rsatilgan.

Aktiv-induktiv (φ > 0) yuklamada mashina yakor reaksiyasining bo'ylama o'q bo'yicha magnitsizlovchi ta'siri tufayli yakor tokining ortishi bilan SG chiqish klemmasidagi kuchlanish kamayadi (bunda $E_0 > U_1$), *aktiv-sig'imiy (φ < 0)* yuklamada esa yakor reaksiyasi mashinaning bo'ylama o'qi bo'yicha magnitlovchi ta'sir ko'rsatadi va I_1 tokning ortishi bilan kuchlanish ham ortadi (bunda $E_0 < U_1$). Sof aktiv (φ = 0) yuklamada esa yakor reaksiyasi mashinaning ko'ndalang o'qi bo'yicha ta'sir qilib, bo'ylama o'qi bo'yicha yo'nalgan asosiy magnit oqimini deformatsiyalaydi, ya'ni uning qutb o'qiga nisbatan simmetrik taqsimlangan shaklini buzadi (bu holda burchak ψ > 0 bo'ladi). Natijada rotorning aylanish yo'nalishiga bog'liq holda qutb o'qining bir tomonida magnit maydon susayadi, ikkinchi tomonida esa kuchayadi va mashina magnit zanjirining bu qismi magnit jihatdan to'yinadi.

Bunda mashinaning *bo'ylama o'qi bo'yicha* yo'nalgan natijaviy magnit oqimi nisbatan kamayadi, demak, *bu holda ham* yakor reaksiyasining magnitsizlovchi ta'siri mashinaning bo'ylama o'qi bo'yicha bo'lar ekan. Shuning uchun yuklama toki I_1ning ortishi bilan kuchlanish kamayadi ($E_0 > U_1$) .

Agar SG ning tashqi xarakteristikasini tajribada olishda nominal yuklama ($I_1 = I_{1N}$)dan salt ishlash rejimigacha kamaytirib olinsa, yakor reaksiyasi ta'sirining kamayishi tufayli (aktiv – induktiv (φ < 0) va aktiv (φ =0) bo'lgan yuklamalarda) kuchlanish oshadi ($U_0 > U_{1N}$), agarda tashqi xarakteristikani tajribada olishda yuklamani nominalgacha oshirib olinsa unda kuchlanish ΔU ga kamayadi. Uning kattaligi foizda

20.2-rasm. *Sinxron generatorning yuklamasini kamaytirib olingan tashqi (**a**) va yuklamasini oshirib olingan rostlash (**b**) xarakteristikalari (bularda: $\varphi = 0$ – aktiv, $\varphi > 0$ – aktiv-induktiv va $\varphi < 0$ - aktiv-sig'imiy xarakterli yuklamalarga xos.*



quyidagicha aniqlanadi:

$$\Delta U_{\%} = [(U_0 - U_{1N}) / U_{1N}] \cdot 100 . \quad (20.19)$$

Odatda SG lar cosφ = 0,85÷0,9 bilan kuchlanishdan orqada qoluvchi tokda ishlaydilar. Bu holda ΔU = 20÷30 % bo'ladi. Iste'molchilar nominal kuchlanish U_N va unga yaqin kuchlanish bilan ishlashi uchun SG qo'zg'atishni avtomatik rostlash qurilmasi bilan ta'minlanib, kuchlanish rostlanib turiladi.

Sinxron generator EYK larining amaliy (Pote) diagrammasi.

Nominal yuklama bilan ishlab turgan SG ning yuklamasi birdaniga uzib qo'yilgandan keyin rotorning aylanish chastotasi va qo'zg'atish tokining qiymati o'zgartirilmay qoldirilsa SG ning chiqish klemmalaridagi kuchlanish nominal qiymatiga nisbatan ΔU kattalikka oshadi. Buni grafik usulda *EYK larning amaliy (Pote) diagrammasidan* aniqlash mumkin.

Buning uchun bitta grafikda salt ishlash va qisqa tutashuv xarakteristikalari quriladi. Amaliy diagrammada kattaliklar nisbiy birliklarda beriladi va uni aktiv-induktiv xarakterli yuklama ulangan noayon qutbli sinxron generator uchun qurish tartibi quyidagidan iborat:

1) Ordinatalar o'qiga 0A = $\underline{U}_N$ vektori chiziladi;

2) kuchlanish $\underline{U}_N$ dan φ_N burchakka orqada qoluvchi $\underline{I}_{1N}$ vektori chiziladi;

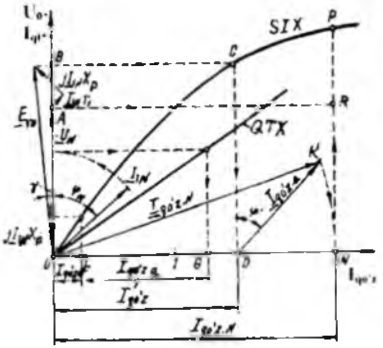
3) $\underline{U}_N$ vektorga mashinaning aktiv ($\underline{I}_{1N} \cdot r_1$) va induktiv ($j\underline{I}_{1N} \cdot x_p$) qarshiliklaridagi kuchlanish pasayishi vektorlarini geometrik qo'shib nominal yuklamada ishlayotgan SG ning EYK 0C = $\underline{E}_{yu}$ aniqlanadi, ya'ni

$$\underline{E}_{yu} = \underline{U}_N + \underline{I}_{1N} \cdot r_1 + j\underline{I}_{1N} \cdot x_P , \quad (20.20)$$

bunda x_p — reaktiv uchburchagidan aniqlangan Pote qarshiligi (bu qarshilik odatdagi tarqoq induktiv qarshilikdan nisbatan kattaroq bo'lib qo'zg'atish chulg'amida hosil bo'lgan tarqoq magnit oqim tufayli magnit o'zakning qo'shimcha magnit to'yinishini hisobga oladi);

4) 0 nuqtadan 0C radiusida chizib ordinatalar o'qida B nuqta hosil qilinadi va undan absissalar o'qiga yordamchi (punktir) parallel chiziq o'tkazamiz va uning salt ishlash xarakteristikasi bilan kesishgan nuqtasini "K" bilan belgilab, bu nuqtadan absissalar o'qiga perpendikular bo'lgan yordamchi (punktir) chiziq o'tkazib D nuqta hosil qilinadi va EYK E_{yu} ni hosil qiluvchi qo'zg'atish toki $0D = I'_{qo'z}$ aniqlanadi. SG salt ishlagandagi EYK E_0 yuklama ulangan mashinaning EYK $\underline{E}_{yu}$ dan bo'ylama yakor reaksiyasi EYK $\underline{E}_{ad}$ qiymatga katta bo'ladi, ya'ni

$$\underline{E}_0 = \underline{E}_{yu.N} + \underline{E}_{ad}; \qquad (20.21)$$



20.3-rasm. *Sinxron generator EYK larining amaliy (Potye) diagrammasi.*

5) yakor reaksiyasi EYK $\underline{E}_{ad}$ qiymatni hisobga olish uchun yakor reaksiyasining bo'ylama magnitsizlovchi ta'siriga mos keladigan qo'zg'atish toki $I_{qo'z.a}$ ni aniqlaymiz (buning kattaligi 20.1-rasmda qisqa tutashuv tajrbasidan grafik usulda aniqlangan mashina bo'ylama yakor reaksiyasini kompensatsiyalovchi qo'zg'atish toki $I_{qo'z.a}$ kabi aniqlanadi); bu kattalik 20.3-rasmda boshqa masshtabda $LG = I_{qo'z.a}$ belgilangan;

6) so'ngra D nuqtadan CD ga $\varphi' = \varphi + \gamma$ burchak ostida vektor $\underline{DK} = \underline{I}_{qo'z.a}$ ni o'tkazamiz. Markaz 0 dan 0K radius bilan absissalar o'qi bilan N nuqtada kesishguncha yoy chiziladi. U holda $0N = I_{qo'z.N}$ qo'zg'atish tokining qiymati EYK $E_0 = NP$ ga mos keladi. A nuqtadan absissalar o'qiga parallel qilib AR chiziqni o'tkazib izlanayotgan ΔU_N ni olamiz:

$$\Delta U_N = [(NP - NR) / NR] \cdot 100 = [(E_0 - U_N) / U_N] \cdot 100. \quad (20.22)$$

Rostlash xarakteristikasi. Bu xarakteristika $U = U_N$ = const, $\cos\varphi$ = const va $f = f_N$ = sonst bo'lganda, $I_{qo'z} = f(I_1)$ bog'liqlikni ifodalaydi.

20.2-rasmda SG ning uch xil xarakterli yuklamaga tegishli $\cos\varphi$ qiymatlari uchun *rostlash xarakteristikalari* ko'rsatilgan.

Aktiv-induktiv ($\varphi > 0$) xarakterli yuklamada I_1 tokning ortishi bilan yakor reaksiyasining mashina bo'ylama o'qi bo'yicha magnitsizlovchi ta'siri oshadi, sof aktiv ($\varphi = 0$) yuklamada ham, tashqi xarakteristikaning tahlilida ta'kidlanganidek mashinaning bo'ylama o'qi bo'yicha nisbatan kam miqdorda magnitsizlovchi ta'sir qiladi va SG ning chiqish klemmalaridagi kuchlanish pasayadi, shartga ko'ra esa, U_1 =const bo'lishi uchun qo'zg'atish tokini oshirish zarur bo'ladi. Aktiv-sig'imiy ($\varphi < 0$) xarakterli yuklamada yakor reaksiyasi magnitlovchi ta'sir qilishi tufayli kuchlanish ortadi, bu holda U_1 = const bo'lishini ta'minlash uchun esa qo'zg'atish tokini kamaytirish kerak bo'ladi.

Nazorat savollari:

1. SG salt ishlash xarakteristikasining ahamiyati nimadan iborat?

2. Yakor reaksiyasi nima va u SG xarakteristikalariga qanday ta'sir qiladi?

3. SG ning IYX si nima uchun SIX dan pastda joylashadi?

4. Qisqa tutashuv nisbati nima va u qanday aniqlanadi?

5. SG ning induktiv qarshiliklari tajribada qanday aniqlanadi?

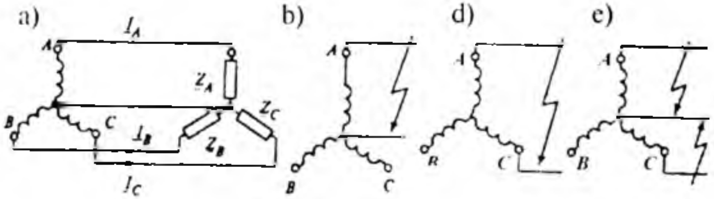
21-BOB. SINXRON GENERATORLARNING NOSIMMETRIK BARQARORLASHGAN ISH REJIMLARI

21.1. Nosimmetrik yuklamada sinxron generatorning ishi

Dastlabki ma'lumot. Sinxron generator energiya bilan ta'minlayotgan elektr tarmoqqa simmetrik yuklamadan tashqari bir fazali yuklamalar (masalan, elektr chiroqlari, bir fazali tokda ishlaydigan elektr transporti, elektr pechlari va elektr yoyi bilan payvandlash transformatorlari va boshq.) ham ulanganda yoki *bir fazali* va *ikki fazali* qisqa tutashuv (21.1, b,d-rasm)rejimlarda fazaviy toklarning nosimmetrikligi vujudga kelib, bunda faza toklarining orasidagi siljish burchagi 120° elektr burchakka teng bo'lmaydi.

Bunday nosimmetrik rejimni tahlil qilish uchun uch fazali transformatorlardagi nosimmetrik sistema tahlil qilinganidek simmetrik tashkil etuvchilar usulidan foydalaniladi. Bunda I_A, I_B, I_C – uch fazali nosimmetrik toklar sistemasini to'g'ri I_1, teskari I_2 va nol I_0 ketma-ketlikli simmetrik toklar sistemasiga ajratadilar (8.1-banddga qarang).

Toklar sistemasining to'g'ri ketma-ketligi I_{A1}, I_{B1}, I_{C1} uch fazali sinxron mashinada rotor bilan bir xil chastotada aylanadigan yakor MYK ni hosil qiladi. Bu MYK rotor chulg'amlariga nisbatan qo'zg'almasdir. To'g'ri ketma-ketlikli toklar uchun yakor chulg'amining induktiv qarshiligi x_d va x_q larga teng.



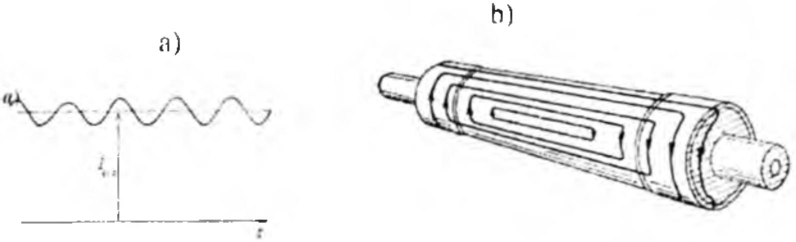
21.1-rasm. *Uch fazali sinxron generatorning yuklamasi nosimmetrik ($Z_A \neq Z_B \neq Z_C$) (**a**) hol uchun hamda bir (**b**), ikki (**d**) va neytralga tushgan ikki fazali (**e**) qisqa tutashuv sxemalari.*

Teskari ketma-ketlikli toklarning sinxron generator ishiga ta'siri. Toklar sistemasining teskari ketma-ketligi I_{A2}, I_{B2}, I_{C2} rotorning aylanish yo'nalishiga teskari tomonga aylanadigan yakor MYK ni hosil qiladi. Demak, teskari ketma-ketlikli toklarning hosil qilgan magnit maydoni

rotordagi qo'zg'atish va tinchlantirish (dempfer) chulg'amlarni kesib o'tadi va ularda EYK larni (demak, toklarni ham) hosil qiladi. Bu EYK va toklarning (21.1,*b*-rasm) chastotasi yakor chulg'aminikiga nisbatan 2 marotaba kattadir.

Teskari ketma-ketlikli toklar hosil qilgan teskari aylanma maydonga turbogeneratorlar nihoyatda sezgirdirlar, chunki ularning rotori massiv (quyma, ya'ni yaxlit) bo'lgani uchun ularda isroflar katta bo'lib, rotorning ortiqcha qizishi xavfli, mashinaning FIK ham kamayadi. Shu sababli nosimmetrik yuklamada turbogenerator quvvatini nisbatan kamaytirish lozim bo'ladi.

Qo'zg'atish chulg'amida hosil bo'ladigan, chastotasi esa 2 marotaba oshgan o'zgaruvchan toklar, shu chulg'amning o'zgarmas tokiga ta'sir qilib (ya'ni qo'shilib) 21.2,*a*-rasmdagidek o'zgaradigan tokni hosil qiladi.



21.2-rasm. *Sinxron generatorning nosimmetrik yuklamasida qo'zg'atish chulg'ami tokining o'zgarish shakli (**a**) va turbogenerator rotorida teskari ketma-ketlik maydono hosil qilgan toklar o'tadigan yo'llar sxemasi (**b**).*

Qo'zg'atish maydonining stator teskari ketma-ketlikli maydoni bilan hamda statorning to'g'ri ketma-ketlikli maydoni va chastotasi 2 marotaba oshgan rotor tokining maydoni bilan o'zaro ta'sirlari natijasida mashinada tarmoq chastotasidan ikki karra katta bo'lgan o'zgaruvchan ishorali pulslanuvchi momentlar tufayli tangensial kuchlar paydo bo'lib qo'shimcha titrash (vibratsiya) sodir bo'ladi.

Rotor chulg'amlaridagi EYK va tokning chastotasi yakor chulg'aminikiga nisbatan 2 marotaba katta bo'lgani uchun, teskari ketma-ketlikli toklarni hisoblashda o'ta o'tkinchi (yoki o'tkinchi)

induktiv qarshiliklardan foydalanish tavsiya qilinadi. *Boshqacha aytganda*, teskari ketma-ketlikli oqimlar uchun qisqa tutashgan tinchlantirish (dempfer) chulg'ami, xuddi asinxron mashinalardagi qisqa tutashgan rotor chulg'amining stator aylanma magnit oqimiga ta'siri kabi vazifani o'taydi.

Noayon qutbli sinxron generatorda teskari ketma-ketlikli maydonga massiv rotorda induksiyalanadigan uyurma toklar aks ta'sir ko'rsatib, uning ta'sirini ancha susaytiradi.

Ayon qutbli sinxron generatorda teskari ketma-ketlikli oqim dempfer chulg'amida EYK ni (demak, toklarni ham) hosil qilib, ular o'z navbatida *Lens qoidasiga binoan*, bu oqimga magnitsizlovchi ta'sir qiladi va mashinaning teskari ketma-ketlikli natijaviy oqimi kamayadi.

Teskari ketma-ketlikli oqim rotorning goh bo'ylama va goho ko'ndalang o'qlarini kesib o'tadi. Shu sababdan teskari ketma-ketlikli toklar uchun mashina induktiv qarshiligining o'rtacha qiymatini quyidagiga teng deb olish mumkin:

$$x_2 = 0.5\,(x''_d + x''_q), \qquad (21.1)$$

agar dempfer chulg'ami yakor aylanasi bo'ylab joylashgan bo'lsa, unda

$$x_2 \approx x''_d \approx x''_q. \qquad (21.2)$$

Teskari ketma-ketlikli induktiv qarshilik x_2 ni tajribada olish uchun sinxron mashina stator chulg'amini o'zgaruvchan tok tarmog'iga ulab, uning rotorini maydonning aylanishiga teskari tomonga sinxron chastota bilan aylantirish kerak bo'ladi (bunda qo'zg'atish chulg'amiga ulangan voltmetr katta kuchlanishni ko'rsatadi).

Dempfer chulg'ami bilan ta'minlangan ayon qutbli sinxron generatorlarda teskari ketma-ketlikli induktiv qarshilik $x_{2*} = 0{,}15 \div \div 0{,}35$, turbogeneratorlarda esa dempfer chulg'ami vazifasini rotor massivi bajaradi va ularda $x_{2*} = 0{,}12 \div 0{,}25$.

Nol ketma-ketlikli toklarning sinxron generator ishiga ta'siri. Nosimmetrik yuklamada nol ketma-ketlikli toklar faza chulg'amlari "yulduz" sxemasiga ulangan stator chulg'amining nol nuqtasi tashqariga chiqarilgan yoki bu nuqta zaminlangan bo'lganda paydo bo'ladi.

Ma'lumki, nol ketma-ketlikli toklar hamma fazalarda bir xil va yo'nalishi bo'yicha mos tushadi. Shu sababli ular fazoda bir-biridan 120° el. burchakka siljigan stator faza chulg'amlari bo'yicha o'tganda, ular vujudga keltirgan MYK larning 1-garmonikasi istalgan vaqt uchun

uchta bir-biriga teng, lekin bir-biriga nisbatan 120° ga siljigan MYK larni hosil qiladi. Bu uchta MYK ning yig'indisi nolga teng va, demak, nol ketma-ketlikli toklar mashinaning havo oralig'ida magnit maydonning 1-garmonikasini yaratmaydi. Mashinaning havo oralig'idagi magnit maydonni uch karrali pulslanuvchi MYK lar yaratadi.

Bu garmonikalar yaratgan maydonlarning qiymati kichik, shu sababli ular qo'zg'atish va dempfer chulg'amlarida hosil qiladigan EYK va toklar ham kam bo'ladi.

Yakor faza chulg'amining nol ketma-ketlikli toklarga ko'rsatadigan qarshiligini nol ketma-ketlikli qarshilik deyiladi, ya'ni:

$$\underline{Z}_0 = r_0 + jx_0. \qquad (21.2)$$

Nol ketma-ketlikli induktiv qarshilik x_0 asosan tarqoq maydon tomonidan hosil qilinadi va shu sababli nisbatan kam bo'ladi. Nisbiy birliklarda u quyidagiga teng, ya'ni $x_{0*} = 0{,}02 \div 0{,}1$. Nol ketma-ketlikli aktiv qarshilik taxminan to'g'ri ketma-ketlikli aktiv qarshilikka teng: $r_0 \approx r_a$.

Kuchlanish tushishi $\underline{U}_0 = I_0 Z_0$ mashinaning barcha fazalarida bir xil yo'nalishga ega va faza kuchlanishlarining nosimmetrikligini vujudga keltiradi. Nol ketma-ketlikli toklar liniyaviy kuchlanishlar simmetriyasiga ta'sir ko'rsatmaydi.

21.2. Sinxron generatorda nosimmetrik qisqa tutashuvlar

Sinxron generatorlarni ekspluatatsiya qilish jarayonida ikki va bir fazali qisqa tutashuvlar bo'lib turadi. Simmetrik tashkil etuvchilar usulidan foydalanib qisqa tutashuv toklarining barqaror qiymatlari uchun quyidagi hisobiy ifodalarni olish mumkin:

ikki fazali qisqa tutashuv uchun

$$I_{qt.2} = \sqrt{3}\,E_0 \,/\, (x_d + x_2); \qquad (21.3)$$

bir fazali qisqa tutashuv uchun

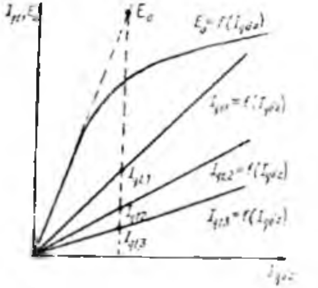
$$I_{qt.1} = 3E_0 \,/\, (x_d + x_2 + x_0); \qquad (21.4)$$

uch fazali qisqa tutashuv uchun

$$I_{qt.3} = I_{qt} = E_0 \,/\, x_d\,. \qquad (21.5)$$

Qisqa tutashuv toklari amaliy jihatdan sof induktiv hisoblanadi.

Qisqa tutashuv xarakteristikalaridan bir fazalisi eng yuqorida, undan pastroqda ikki fazalisi va undan yana pastroqda uch fazalisining joylashishiga sabab bo'ylama magnitsizlovchi yakor reaksiyasi



21.3-rasm. *Sinxron generatorning bir, ikki va uch fazali qisqa tutashuv xarakteristikalari.*

nosimmetrik yuklamada faqat to'g'ri ketma-ketlikli toklarni hosil qiladi. Uch fazali qisqa tutashuvda qisqa tutashuv toki ($I_{qt.3}$) ning bari, ikki fazalida qisqa tutashuv tokining bir qismi ($I_{qt.2}/\sqrt{3}$), bir fazalida esa $I_{qt.2}/3$. Shu sababli bir xil qiymatli ($I_{qt.3} = I_{qt.2} = I_{qt.1}$) qisqa tutashuv toklarini olish uchun uch fazalida eng ko'p, ikki fazalida kam, bir fazalida esa undan ham kam qo'zg'atish toki talab qilinadi. Qisqa tutashuv xarakteristikalaridan mashinaning x_2 va x_0 parametrlarini aniqlash mumkin. Buning uchun qisqa tutashuv toklari uchun (21.3), (21.4) va (21.5) tenglamalarni birgalikda yechib quyidagilarga ega bo'lamiz:

$$x_2 = \sqrt{3}\,E_0/\,I_{qt.2} - E_0/\,I_{qt.3}; \qquad (21.6)$$

$$x_0 = 3E_0/\,I_{qt.1} - \sqrt{3}\,E_0/\,I_{qt.2}. \qquad (21.7)$$

21.3-rasmdan qo'zg'atish toki $I_{qo'z}$ ning bir xil qiymatiga to'g'ri keladigan $I_{qt.3}$, $I_{qt.2}$ va $I_{qt.1}$ toklarning hamda shu $I_{qo'z}$ ga mos keladigan salt ishlash xarakteristikasining to'g'ri chiziqli qismidan aniqlanadigan EYK E_0 ning qiymatini (21.6) va (21.7) larga qo'yib mashinaning x_2 va x_0 parametrlarini olamiz.

Nazorat savollari:

1. *Nosimmetrik rejimlarning kelib chiqish sabablari nimalardan iborat?*
2. *Nosimmetrik rejimlarni tekshirishda qaysi usuldan foydalaniladi?*
3. *Teskari ketma-ketlikli toklar sinxron generator ishiga qanday ta'sir qiladi?*
4. *Nosimmetrik qisqa tutashuvlar to'g'risida ma'lumot bering.*

22-BOB. SINXRON GENERATORDA TO'SATDAN UCH FAZALI QISQA TUTASHUVDAGI O'TISH JARAYONLARI

22.1. Dastlabki ma'lumot va ekvivalent kontur to'g'risida tushuncha

Qisqa tutashuvning boshlanish onidan barqaror qisqa tutashuv rejimigacha o'tgan vaqt ichidagi rejimni *to'satdan qisqa tutashuv* deb tushuniladi.

Sinxron mashinalarning o'tish jarayonlarida, masalan, to'satdan qisqa tutashuvda yoki yuklamaning keskin o'zgarishida sodir bo'ladigan jarayonlar juda ham murakkab bo'lib, ularni miqdor jihatdan aniq hisoblash ancha qiyinchiliklarni tug'diradi (ya'ni maxsus matematik metodlarni va EHM ni qo'llashni talab qiladi). Lekin o'tish rejimlarda sinxron mashinalarning *o'zini tutishi* juda katta amaliy ahamiyatga ega bo'ladi, chunki o'tish jarayonnining boshlang'ich onida nominal qiymatidan birnecha (10—15) marta katta bo'lgan toklar paydo bo'lib, ular chulg'amlarni buzishga olib keluvchi elektrodinamik kuchlarni yuzaga keltirishi mumkin, chunki bu kuchlar mazkur toklarning kvadratiga mutanosib ravishda o'zgaradi.

Avariya tufayli generatordan elektr energiya bilan ta'minlanayotgan ob'ektlarda energiyaning uzilishi, yoki sinxron motorli elektr yuritmalar ishining to'xtab qolishi ancha zarar keltiradi. Shu sababli o'tish jarayonlarda sodir bo'ladigan fizik jarayonlar to'g'risida (masalan, qisqa tutashuvda paydo bo'ladigan avariya toklarining taxminiy qiymatlariga oid) umumiy tasavvurga ega bo'lish muhim ahamiyat kasb etadi.

Salt ishlash rejimida avtonom elektr tarmoqqa ishlayotgan ayon qutbli sinxron generatorning klemmalarida sodir bo'lgan *to'satdan uch fazali qisqa tutashuvning bitta ekvivalent (ya'ni teng kuchli) g'altak konturidan iborat bo'lgan faza chulg'ami (A—X)da bo'ladigan jarayonni ko'rib chiqamiz*. To'satdan uch fazali qisqa tutashuv generator klemmalarida sodir bo'lganda qisqa tutashuv toki faqat generator parametrlari orqali aniqlanadi va uning qiymati qisqa tutashuv elektr tarmog'ida sodir bo'lgandagiga nisbatan katta bo'ladi.

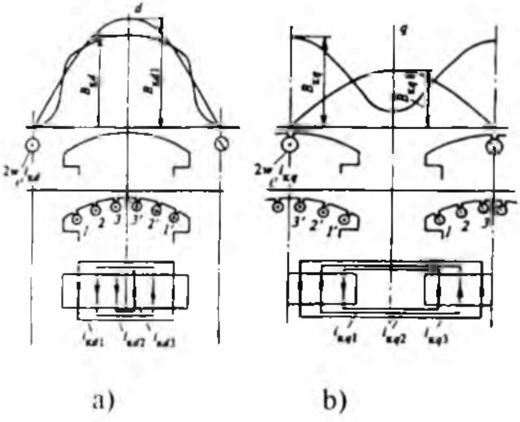
Bunda quyidagi cheklanishlar, ya'ni: qisqa tutashuv vaqtida rotorning aylanish chastotasi, magnit zanjirining to'yinish darajasi va qo'zg'atish chulg'amiga berilgan kuchlanish o'zgarmay qoladi deb, hamda katta quvvatli mashina chulg'amlarining aktiv qarshiligi ularning induktiv

qarshiligidan ancha kichikligidan ularni e'tiborga olmay, bu chulg'amlar *o'ta o'tkazgichli* deb faraz qilinadi. Bu cheklanishlar qisqa tutashuvdagi o'tish jarayonni o'rganishni ancha yengillashtiradi (bundagi yo'l qo'yilgan xatoliklar esa nisbatan kam).

Kirxgofning ikkinchi qonuniga asosan o'ta o'tkazgich konturida vaqt birligi ichida $d\psi / dt = 0$ bo'ladi. (I z o h: $\psi = w\Phi$ – oqim ilashishi; darslikning mazkur bobida "oqim ilashishi" tushunchasi o'rniga ayrim hollarda "ψ" ni "magnit oqimi" deb bayon qilingan, chunki o'ta o'tkazuvchan konturni bitta ekvivalent konturi bilan almashtirilgan holda o'rganilganda bu tushunchalar teng kuchlidir). Istalgan vaqtda o'ta o'tkazgich konturida to'la oqim o'zgarmas bo'ladi, ya'ni:

$$\psi = \psi_{kes} + \psi_L = const, \qquad (22.1)$$

bu yerda ψ_{kes} – stator faza chulg'ami konturini kesib o'tuvchi oqim va ψ_L – o'zinduksiya tufayli hosil bo'lgan oqim.



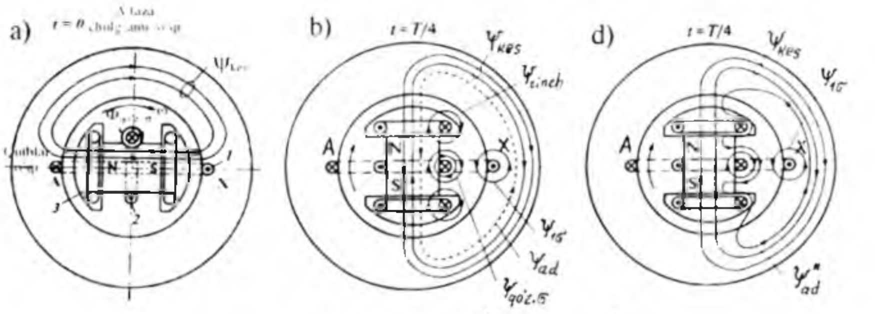
22.1-rasm. *Sinxron generatorning ko'p konturli dempfer chulg'amini har bir qutb bo'linmasida ikkita ekvivalent dempfer konturi bilan almashtirish:* ***a*** *– bo'ylama ekvivalent konturi* ***(kd)*** *i_{kd} toki bilan va* ***b*** *– ko'ndalang ekvivalent konturi* ***(kq)*** *i_{kq} toki bilan;* w_e *– ekvivalent konturining o'ramlar soni (hisoblarda ixtiyoriy tanlanadi).*

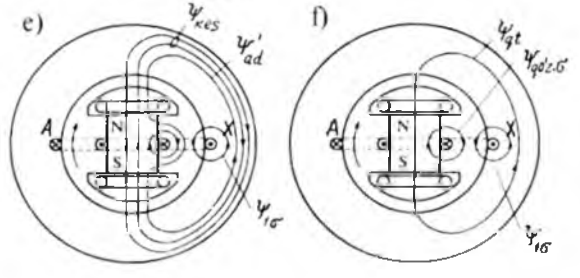
Sinxron generatorning ko'p konturli dempfer chulg'amini har bir qutb bo'linmasida ikkita ekvivalent dempfer konturi bilan almashtirish yo'li bilan o'rganiladi (22.1-rasm). Ekvivalent dempfer konturidagi tok i_{kd} mashina havo oralig'ida hosil qiladigan magnit maydon asosiy garmonikasi bo'ylama toklar sistemasi (i_{kd1}, i_{kd2}, i_{kd3} ...) hosil qilgan magnit maydonniki bilan bir xil bo'lishi kerak (22.1,*a*-rasm). Xuddi shuningdek, mashina ko'ndalang o'qi bo'yicha ekvivalent dempfer konturidagi tok i_{kq} havo oraliqda hosil qiladigan maydon shu o'q bo'yicha toklar sistemasi (i_{kq1}, i_{kq2}, i_{kq3} ...) hosil qilgan maydonniki bilan (22.1,*a*-rasm) bir xil bo'lishi lozim.

O'tish jarayonlarda stator toki *barqaror (davriy) va erkin (nodavriy)* tashkil etuvchilardan iborat bo'ladi. Tokning erkin tashkil etuvchisi qisqa tutashuvning boshlang'ich paytida yakorning faza chulg'amida hosil bo'lgan EYK ning t = 0 dagi oniy qiymatidan, ya'ni uning boshlang'ich fazasidan bog'liq bo'ladi.

22.2. Magnit oqim stator faza chulg'ami bilan ilashmagan (ψ_{kes}= 0) holatida to'satdan qisqa tutashuv jarayoni

Magnit oqim A faza chulg'am g'altagi bilan ilashmagan (ψ_{kes}=0) holat qutblar o'qi faza chulg'ami joylashgan tekislik bilan mos tushganga to'g'ri keladi (22.2,*a*-rasm). Bunday holatda qisqa tutashuv boshlanishidan oldin t= 0, burchak α=0, shartga ko'ra (ya'ni salt ishlashda), qisqa tutashuv toki i_{qt} = 0, demak, g'altakda hosil bo'ladigan EYK eng katta (e_{kes}=$E_{kes\ max}$) qiymatga erishadi.



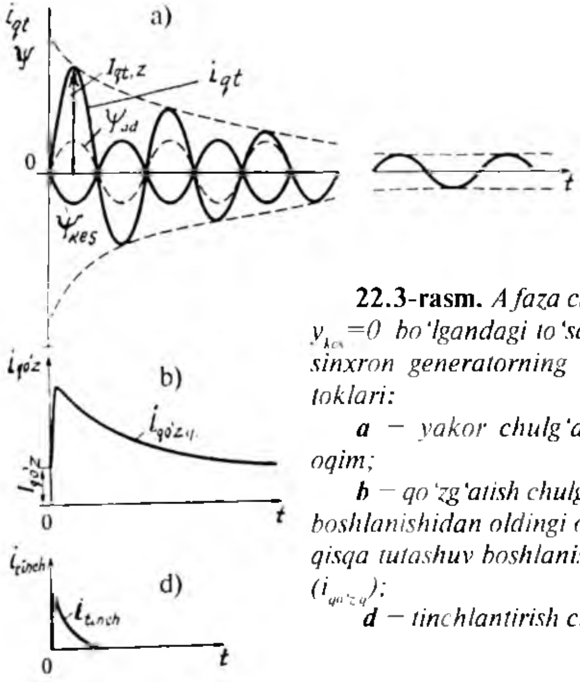


22.2-rasm. *To'satdan qisqa tutashuvdan oldin (t=0) SG ning A faza chulg'ami oqim ilashishi ψ_{kes}=0 bo'lganda rotorning fazoda tutgan holati, ya'ni A–X g'altak joylashgan tekislik bilan qut o'qi mos tushgan holati (α=0°) va magnit maydoni:* ***1*** *– yakor chulg'ami;* ***2*** *– qo'zg'atish chulg'ami;* ***3*** *– tinchlantirish chulg'ami (****a****) hamda to'satdan qisqa tutashuv tokining t = T/4 davrida A fazada maksimal qiymatga erishgan holdagi (****b****;* ***d****) va keyingi bosqichda bu toklarning barqaror qisqa tutashuv rejimiga qadar so'nish jarayonidagi (****e****;* ***f****) magnit maydonlar*

Sinxron generator salt ishlash rejimda faqat qo'zg'atish chulg'amidan o'tgan tok $I_{qo'z}$ hosil qilgan magnit oqim $\Phi_{qo'z}$ ning faza chulg'am g'altagi bilan ilashishi ψ_{kes} ta'sirida bo'ladi (22.2,*a*-rasm), ya'ni rotor $\alpha = 0$ dan $\alpha = \pi/2$ gacha burilganda bu oqim $\psi_{kes} = 0$ dan o'zining eng katta qiymati ($\psi_{kes} = \psi_{kes.max}$) gacha oshgan bo'lar edi; undan keyin rotor $\alpha = \pi/2$ dan $\alpha = \pi$ gacha burilganda oqim $\psi_{kes.max}$ qiymatidan $\psi_{kes} = 0$ gacha kamayardi va hokazo.

Qisqa tutashuvning boshlang'ich paytida sinxron mashina barcha (qo'zg'atish, tinchlantirish va yakor) chulg'amlarining oqim ilashishlari o'zgarmasdan saqlanishi kerak. Rotor aylanganda ($t > 0$) uning magnit oqimi A faza o'ramlarini birin-ketin chulg'b oladi. Bu g'altakda $\psi_{kes}=0$ holat saqlanishi uchun fazaviy chulg'amda shunday davriy tok $i_{qt.A}$ paydo bo'lib, uning hosil qilgan magnit oqim ilashishi ψ_{ad} qo'zg'atish oqimiga (bu holda $\psi_{qo'z}=\psi_{kes}$) teskari yo'nalgan bo'ladi (22.3,*a*-rasmda *shtrix chiziqli sinusoida)*.

Qisqa tutashuv toki hosil qiladigan oqim ilashishi ψ_{ad} ni yakor reaksiyasi magnit oqimi sifatida qarash mumkin.



22.3-rasm. *A faza chulg'ami oqim ilashishi $\psi_{kes}=0$ bo'lgandagi to'satdan qisqa tutashuvda sinxron generatorning magnit oqimlari va toklari:*

a *– yakor chulg'amdagi tok va magnit oqim;*

b *– qo'zg'atish chulg'amning qisqa tutashuv boshlanishidan oldingi o'zgarmas toki ($I_{qo'z}$) va qisqa tutashuv boshlanishidagi qo'shimcha tok ($i_{qo'z.q}$);*

d *– tinchlantirish chulg'amdagi tok (i_{tinch}).*

Lekin barqaror ish rejimdagi (xususan, barqaror qisqa tutashuvdagi) yakor reaksiyasi oqimi bilan to'satdan qisqa tutashuv paytdagi yakor reaksiyasi oqimi o'rtasida *juda ham katta farq bor.*

Haqiqatda, yakor reaksiyasi oqimini asosiy oqimdan mustaqil ravishda o'rganilganda, barqaror qisqa tutashuvda mashina bo'ylama o'qi bo'yicha yakor reaksiyasining oqimi magnit zanjirda asosiy magnit oqim o'tgan yo'llar orqali o'tadi (22.2,*b*-rasmda *shtrixli chiziq).* To'satdan qisqa tutashuvda esa tasvir keskin o'zgaradi, chunki shartga ko'ra, qo'zg'atish chulg'ami va tinchlantirish chulg'ami o'ta o'tkazuvchan konturlar hisoblanganligidan, ular bilan ilashgan oqimlar o'zgarmasdan qolishlari kerak, bunday holda tinchlantirish (dempfer) chulg'amida (i_{tinch}) (22.4.*a*-rasm) va qo'zg'atish chulg'amida ($i_{qo'z}$) (22.4.*c*-rasm) ***nodavriy toklar*** hosil bo'ladi. Ularning vujudga keltirgan magnit oqimlari ($\Phi_{qo'z.q}$ va Φ_{tinch}) yakor oqim ilashishi ψ_{ad} ni rotor konturlariga kirishiga to'sqinlik qilib, uni bu chulg'amlarning tarqoq oqimi o'tadigan yo'llardan o'tishga majbur qiladi, ya'ni havo oraliqqa siqib chiqaradi. Bu yo'l (ya'ni havo oraliq)ning magnit o'tkazuvchanligi rotor o'zaginikiga nisbatan ancha kam bo'lganligidan to'satdan qisqa tutashuvda yakor magnit oqimi ψ_{ad} ni yaratish uchun ancha katta qiymatli yakor chulg'ami MYK, demak, barqaror qisqa tutashuv tokiga nisbatan ancha katta tok talab qilinadi. Bu tok o'zining maksimal qiymatiga to'satdan qisqa tutashuv boshlanishidan chorak (T/4) davrdan keyin erishadi va uni *zarbiy tok* $I_{qt.z}$ deb ataladi (22.3,*a*-rasm).

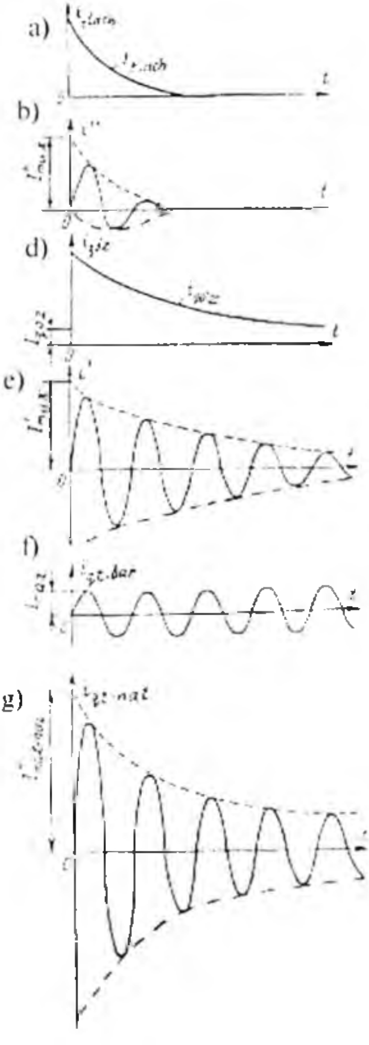
Dastlab tinchlantirish chulg'amining oqimi ψ_{tinch} yakor chulg'ami oqimi ψ_{ad} ning qo'zg'atish chulg'amiga kirishiga to'sqinlik qiladi (22.2.*d*-rasm). Bu hol o'ta o'tkinchi qarshilik x'_d bilan xarakterlanadi. Natijada stator magnit oqimi $\Phi'_{ad} < \Phi_{ad}$ ga qadar ancha kamayadi; mos holda stator chulg'amining mashina bo'ylama o'qi bo'yicha induktiv qarshiligi kamayib, *qisqa tutashuv toki* ($I_{qt.z} = I''_{qt.max}$) ning ta'sir etuvchi qiymati eng katta bo'ladi (22.3,*a*-rasm):

$$I_{qt.z} = I''_{qt.max} = E_0 / x''_d, \qquad (22.2)$$

bu yerda x''_d – o'ta o'tkinchi induktiv qarshilik.

Yakor oqimi ψ_{ad} tinchlantirish chulg'amiga kirgandan keyingi bosqichda uning o'zgarishiga *qo'zg'atish chulg'amidagi qo'shimcha oqim* $F_{qo'z.q}$ aks ta'sir qiladi (22.2.*e*-rasm). Bu holat o'tkinchi qarshilik x'_d bilan xarakterlanadi.

Ideal o'ta o'tkazuvchan konturda magnit oqimlarning mashina magnit zan-jirida 22.2.*d*-rasmdagidek taqsimlanish tasviri uzoq davom



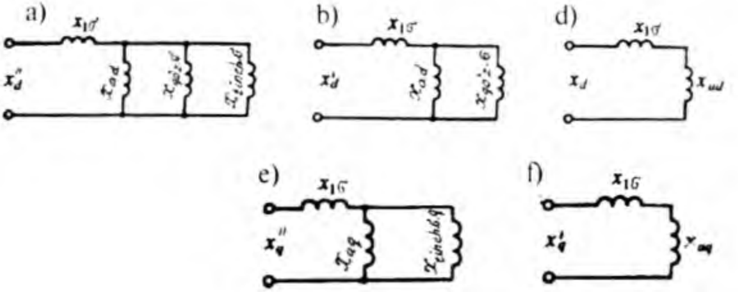
22.4-rasm. *Sinxron generatorda to'satdan qisqa tutashuv toklari:* ***a*** *– tinchlantirish chulg'amdagi tok;* ***b*** *– bu tokning yakordagi tashkil etuvchisi;* ***d*** *– qo'zg'atish chilg'amidagi tok;* ***e*** *– bu tokning yakordagi tashkil etuvchisi;* ***f*** *– yakordagi barqaror qisqa tutashuv tok;* ***g*** *– yakordagi natijaviy qisqa tutashuv tok.*

etgan bo'lardi, lekin rotor chulg'amlari har holda oz bo'lsa ham aktiv qarshilikka ega bo'lganligidan qo'zg'atish chulg'amidagi qo'shimcha tok $i_{qo'z}$ va tinchlantirish chulg'ami toki i_{tinch} ning so'nish jarayoni boshlanadi (22.4-rasmda *a* va *c*). Bu jarayon mazkur konturlarning vaqt doimiysi T dan bog'liq bo'ladi (uning o'lchov birligi, s.):

$$T = L / r, \qquad (22.3)$$

bu yerda L va r – konturning induktivligi va aktiv qarshiligi.

Bu formuladan ko'rinishicha, chulg'am konturining induktivligi kichik va aktiv qarshiligi katta bo'lsa so'nish jarayoni tez kechar ekan. Qo'zg'atish chulg'amining o'ramlar soni tinchlantirish chulg'amnikidan ancha katta (demak, $L_{qo'z} > L_{tinch}$ va $T_{qo'z} > T_{tinch}$) bo'lganligidan tinchlantirish chulg'amidagi tok qo'zg'atish chulg'aminikiga nisbatan ancha tez so'nadi. Natijada yakorning magnit oqimi, dastlab tinchlantirish chulg'ami konturiga kirib (22.2,*e*-rasm), $\Phi'_{ad} > \Phi'_{ad}$



22.5-rasm. *To'satdan qisqa tutashuv rejimda sinxron mashinaning bo'ylama o'qi bo'yicha (**a**, **b**, **d**) va ko'ndalang o'qi bo'yicha (**e**, **f**) induktiv qarshiliklari uchun almashtirish sxemalari: **a** – o'ta o'tkinchi induktiv qarshiligi (x''_d) uchun, **b** – o'tkinchi induktiv qarshiligi (x'_d) uchun, **d** – to'satdan qisqa tutashuv simmetrik barqaror qisqa tutashuv rejimga o'tgandagi induktiv qarshilik (x_d) uchun; ko'ndalang o'qi bo'yicha o'ta o'tkinchi x''_q (**e**) va o'tkinchi x'_q (**f**) induktiv qarshiliklari uchun.*

qiymatgacha oshadi. Bunda mashinaning bo'ylama o'qi bo'yicha induktiv qarshiligi, ya'ni o'tkinchi induktiv qarshilik ($x_d > x'_d$) oshishi tufayli qisqa tutashuv toki quyidagi qiymatgacha kamayadi:

$$I'_{qt} = E_0 / x'_d . \qquad (22.5)$$

Bundan keyin qo'zg'atish chulg'amidagi qo'shimcha tok nolgacha kamayadi, yakorning magnit oqimi esa oshadi ($\Phi_{ad} > \Phi'_{ad}$), demak, bunga mos ravishda induktiv qarshilik oshib ($x_d > x'_d$), yakor toki esa quyidagi qiymatgacha kamayadi:

$$I_{qt} = E_0 / x_d . \qquad (22.6)$$

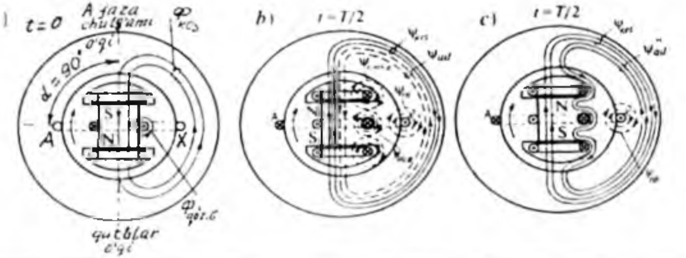
So'nish jarayoni tugagandan keyin generatorda quyidagi natijaviy magnit oqim barqaror topadi:

$$\Phi_{qt} = \Phi_{qo'z} - \Phi_{ad} , \qquad (22.7)$$

va barqaror qisqa tutashuv rejimi boshlanadi (22.2,e-rasm), bunga quyidagi qisqa tutashuv toki mos keladi (22.3,*a*-rasmning o'ng tomoni):

$$I_{qt\,bar} = E_0 / x_d . \qquad (22.8)$$

Shunday qilib, *yakordagi natijaviy qisqa tutashuv tokni* (22.4,*f*-rasm) uchta, ya'ni tinchlantirish chulg'amiga mos keluvchi *o'ta o'tkinchi* I''_{qt} (22.4,*b*-rasm), qo'zg'atish chulg'amiga mos keluvchi *o'tkinchi* I'_{qt}



22.6-rasm. *Qisqa tutashuv boshlanishidan oldin (t=0) sinxron generatorning A faza chulg'ami oqim ilashishi $\psi_{kes} = \psi_{kes.max}$ bo'lganda rotorning fazoda tutgan holati (**a**) va to'satdan qisqa tutashuv tokining t = T/2 davrida A fazada maksimal qiymatga erishgan holdagi (**b**; **d**) magnit maydonlar.*

(22.4,*e*-rasm) va *barqarorlashgan* $I_{qt.bar}$ (22.4,*f*-rasm) toklar yig'indisidan iborat deb qarash mumkin:

$$I_{qt.nat} = I''_{qt} + I'_{qt} + I_{qt.bar} \,. \qquad (22.9)$$

Uni qisqa tutashuv tokining *davriy* tashkil etuvchisi deyiladi.

To'satdan qisqa tutashuv rejimda sinxron mashinaning bo'ylama o'qi bo'yicha (***a***, ***b***, ***c***) va ko'ndalang o'qi bo'yicha (***e***, **f**) induktiv qarshiliklari uchun *almashtirish sxemalari* 22.5-rasmda ko'rsatilgan.

Nazorat savollari:

1. To'satdan qisqa tutashuv rejimi deb qanday rejimga aytiladi va uni o'rganishdan amaliy maqsad nimadan iborat?

2. To'satdan simmetrik qisqa tutashuvni o'rganish asosidagi o'ta o'tkazuvchanlik hodisasini tushuntiring.

3. Magnit oqim faza chulg'ami konturini kesib o'tmagan ($\psi\psi_{kes} = 0$) holatida to'satdan qisqa tutashuvdagi yakor chulg'ami tokining tashkil etuvchilari qanday hosil bo'ladi?

23-BOB. SINXRON GENERATORNING ELEKTR TARMOG'I BILAN PARALLEL ISHLASHI

23.1. Uch fazali sinxron generatorlarni tarmoqqa parallel ulash

Hozirgi vaqtda bir nechta elektr stansiyalar parallel ishlab, energetika sistemacini hosil qiladi. Sistema iste'molchilarni uzluksiz energiya bilan ta'minlashga, elektr stansiyalarining quvvatidan to'laroq foydalanishiga, ta'mirlash ishlarini osonlashtirish imkonini beradi. Har bir elektr stansiyasida bir nechta generator o'rnatilgan bo'lib, elektr sistemasida yuzlab generatorlar parallel ishlaydi. Ana shuning uchun ham har bir generatorning quvvati energetika sistemasida yuklanishni har qanday o'zgarishi bilan sistemada ishlayotgan generatorning chastotasi va kuchlanishi amalda o'zgarmaydi.

SG ni elektr tarmog'iga yoki ishlab turgan generatorlar bilan parallel ulash uchun quyidagi shartlar bajarilishi shart:

1. Sinxron generatorning EYK E_G elektr tarmog'i kuchlanishiga teng ($\underline{E}_G = \underline{U}_T$) va faza jihatdan 180°, ya'ni teskari yo'nalgan bo'lishi lozim;

2. SG ning chastotasi f_G elektr tarmog'ining chastotasi f_T ga teng ($f_G = f_T$) bo'lishi kerak;

3. Uch fazali SG va elektr tarmog'i fazalarining ketma-ketligi bir xil bo'lishi kerak.

EYK ni tarmoq kuchlanishiga tenglash uchun SG qo'zg'atish toki o'zgartiriladi, chastotalarni tenglash uchun esa generator rotorining aylanish chastotasini o'zgartirish kerak bo'ladi.

Sinxron generatorlarni parallel ulash usullari. SG larni parallel ulashning quyidagi usullari mavjud:

1) aniq sinxronlash usuli – bu usulda generatorlarni parallel ulashning uchta talabi aniq bajarilishi shart.

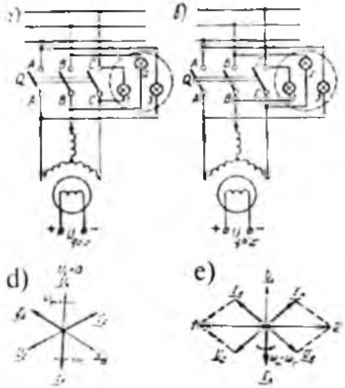
Birinchi shartning bajarilishi generator klemmalariga ulangan voltmetr vositasida, qolgan ikki shart esa "sinxronoskop" asbobi yordamida tekshiriladi (23.1-rasm). Eng oddiy sinxronoskop asbobi *chiroqli (lampali) sinxronoskopdir.*

Agar ulagich Q_l uzilgan bo'lsa, SG salt ishlashi holatida ishlaydi va Q_l klemmalarida EYK $\underline{U} = \underline{E}_G + \underline{U}_T$ bo'ladi. Agarda parallel ulanadigan generatorning aylanish chastotasi o'zgarmas bo'lib, u

nominal aylanish chastotasiga teng bo'lsa, $\underline{E}_G$ va $\underline{U}_T$ lar bir xil burchak chastota bilan aylanardi, natijada $\underline{U}$ ni o'zgarmas qilib saqlab bo'lmaydi, shu sababli $\underline{E}_G$ va $\underline{U}_T$ larning chastotalari orasida farq bo'ladi. Ana shuning uchun ham $\underline{E}_G$ va $\underline{U}_T$ bir-biriga nisbatan $\omega_i - \omega_t = = 2\pi \cdot (f_i - f_t)$ burchak chastota bilan aylanadi. Buning oqibatida U noldan $2U_t$ gacha o'zgaradi va chiroqlardagi kuchlanish ham o'zgarib turadi, ya'ni chiroqlar bir vaqtda yonib va o'chib turadi.

Generatorni tarmoqqa parallel ulashning eng qulay vaqti U= 0 bo'lgandagi holatdir, bunda chiroqlar o'chgan holat bo'ladi. Ana shu vaqtda $\underline{E}_G$ va $\underline{U}_T$ vektorlari bir-biriga nisbatan teskari fazada bo'ladi, ya'ni $\underline{E}_G = -\underline{U}_T$.

Uch fazali SG larni sinxronoskop chiroqlari "o'chish" 23.1,*a*-rasm va "yorug'lik aylanishi" 23.1,*b*-rasm sxemalari bo'yicha ulanadi. Quyida "o'chish" sxemasi (23.1,*a*-rasm) bo'yicha generatorni parallel ulash usulini ko'rib chiqamiz.



23.1-rasm. *Uch fazali SGni elektr tarmog'iga chiroqli sinxronoskop yordamida parallel ulashning: «o'chish»* ***(a)*** *va «yorug'lik aylanishi»* ***(b)*** *sxemalari hamda SGni tarmoqqa ulash paytiga mos keladigan EYK va kuchlanish vektor diagrammalari* ***(d, e)***.

Bu sxemada chiroqlar A-A', B-B' va C-C' nuqtalar orasiga ulangan bo'lib, har bir juft nuqtalar bir fazani tashkil qiladi. Bu nuqtalar orasidagi kuchlanishlar qiymati nolga teng bo'lganda va chiroqlar o'chganda ulagich "Q" qo'shiladi. Bu holda tarmoq kuchlanishi $\underline{U}_T$ va SG EYK $\underline{E}_G$ lar bir-biriga nisbatan teskari fazada bo'ladi (23.1,*a*-rasm).

"Yorug'lik aylanishi" sxemasi bo'yicha generatorni tarmoqqa

parallel ulash 23.1,*b*-rasmda ko'rsatilgan. Bunda 1-chiroq A-A' bir xil faza nuqtalariga, qolgan ikkita chiroq esa har xil faza nuqtalariga B-B' va C-B' ulangan bo'ladi. Ulagich "Q_l" A-A' nuqtadagi chiroq o'chgan va qolgan ikki chiroq esa bir xil ravshan yongan holatda ulanishi kerak.

Ulagich "Q_l" ning yaxshi ulash holatini bilish uchun yuqoridagi sxemada ham A-A' nuqtalar orasiga voltmetr ulanadi. A-A' nuqtalar orasidagi kuchlanish qiymati nol bo'lganda bu voltmetrning strelkasi chiroqlar o'chganda va yonganda sekin tebranadi va nolni ko'rsatadi. Ana shu vaqtda generator ulanishi lozim.

Hozirgi vaqtda elektr stansiyalarda mukammallashgan sinxronoskoplar ishlatilmoqda. Bu sinxronoskoplar SG larni parallel ulashdagi vaqtni aniq ko'rsatib beradi.

2. Noaniq sinxronlash usuli. SG larni *aniq* sinxronlash usuli bilan parallel ulash ko'p vaqt (≈10 minut) talab qiladi. Shuning uchun hozirgi vaqtda juda ko'p elektr stansiyalarda *o'z-o'zini (noaniq) sinxronlash usuli* qo'llanilmoqda. Bu usul bilan SG kuchlanishi va chastotasi tarmoqnikidan nisbatan kam miqdorda farqli bo'lgan holda ham generatorni qisqa vaqtda tarmoqqa parallel ulashga erishiladi.

Noaniq sinxronlashda birlamchi motor yordamida hali qo'zg'atilmagan (qo'zg'atish chulg'ami o'zgarmas tok manbayiga ulanmagan) generatorning rotori sinxron aylanish chastotaga yaqin chastota bilan aylantiriladi, keyin stator chulg'amlari tarmoqqa ulanadi va qo'zg'atish chulg'amiga o'zgarmas tok beriladi. Bu paytda stator tokining tebranishi kuzatiladi. Shuning uchun bu usul generatorni tez va qisqa vaqt ichida tarmoqqa parallel ulash kerak bo'lganda qulay hisoblanadi. Sinxronlashdan oldin generator va tarmoq kuchlanishi ayrim fazalarining ketma-ketligi tekshirilgan bo'lishi shart.

23.2. Sinxron generatorning elektromagnit quvvati va momenti, burchak xarakteristikalari va aktiv quvvatini rostlash

Katta quvvatli (U = const, f = const) elektr tarmog'i bilan parallel ishlayotgan SG ning xarakteristikalari avtonom ishlayotgan SG nikidan umuman farq qiladi. Katta quvvatli tarmoqning kuchlanishi mashinaning har qanday ish rejimidan qat'i nazar o'zgarmaganligi tufayli sinxron mashinaning vektor diagrammasida o'zgarmas bo'ladi.

SG ning aktiv quvvatini o'zgartirish uchun uni harakatga keltirayotgan birlamchi mexanizm (masalan, turbina)ga ta'sir etish, ya'ni uning aylanish chastotasini o'zgartirish lozim. Buni esa turbinaga kelayotgan

suv (GES da) yoki bug' (IES va AES larda) bosimini o'zgartirish yoki o'zgarmas tok motorining qo'zg'atish tokini o'zgartirish, dizel generatorlarda esa yoqilg'i miqdorini oshirish bilan amalga oshiriladi.

Generatorning tarmoqqa berayotgan aktiv quvvati quyidagiga teng:

$$P_2 = P_{em} - P'_{e1} - P'_{m} = m \cdot U_1 \cdot I_1 \cos\varphi , \qquad (23.1)$$

bu yerda: P'_{e1} — stator chulg'ami zanjiridagi elektr isroflar; P'_{m} — stator o'zagidagi magnit isroflar.

Katta va o'rta quvvatli generatorlarda P'_{e1} va P'_{m} isroflari juda ham kichik bo'lganligi tufayli ular hisobga olinmasa, generatorning tarmoqqa berayotgan quvvati quyidagiga teng bo'ladi:

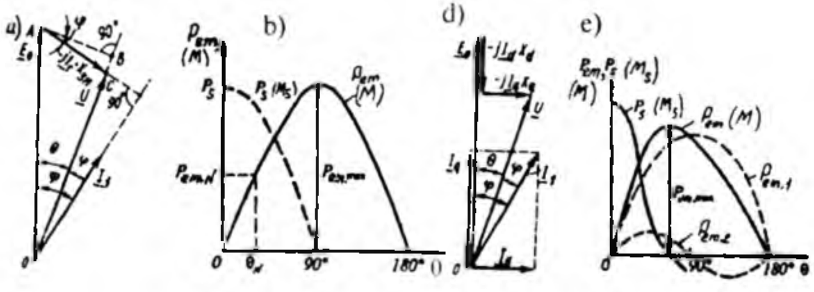
$$P_2 \approx P_{em} = m E_0 \cdot I_1 \cdot \cos\psi . \qquad (23.2)$$

Tarmoq bilan parallel ishlayotgan SG ni tekshirish vaqtida P_{em} quvvatni mashinaning parametrlari, rotorining holati va uning natijaviy magnit maydoni orasidagi siljish burchagi θ orqali ifodalash qulaydir.

Buning uchun (23.1) formula boshqa ko'rinishga keltiriladi. Magnit to'yinishi hisobga olinmagan *noayon qutbli SG ning* 19.6,*a*-rasmda ko'rsatilgan vektor diagrammasi stator chulg'amining aktiv qarshiligi e'tiborga olinmagan ($r_1 \approx 0$, demak, $\underline{I}_1 r_1 = 0$) hol uchun 23.2,*a*-rasmda keltirilgan.

Bu diagrammadan quyidagini aniqlaymiz, ya'ni 0AB va ACB uchburchaklarning umumiy tomoni $\overline{AB} = \underline{0A} \cdot \sin\theta = \underline{AC} \cdot \cos\varphi$ yoki $\underline{0A}$ va $\underline{AC}$ vektorlarning modullari orqali ifodalansa quyidagi tenglikka ega bo'lamiz:

$$E_0 \sin\theta = I_1 x_{sn} \cos\varphi . \qquad (23.3)$$



23.2-rasm. *Noayon qutbli (**a**, **b**) va ayon qutbli (**d**, **e**) SGning elektromagnit quvvatini aniqlashga oid soddalashgan vektor diagrammalar (**a**, **d**) va tegishlicha aktiv quvvatining burchak xarakteristikalari (**b**, **e**).*

Bu tenglamaning ikkala tomonini SG ning fazalar soni m ga va kuchlanishi U ga ko'paytirib, sinxron induktiv qarshilik x_{sn} ga bo'lamiz, natijada uch fazali sinxron mashinaning elektromagnit quvvatini aniqlash formulasi kelib chiqadi:

$$P_{em} = mUI_1\cos\varphi = (mUE_0 / x_{sn})\sin\theta. \qquad (23.4)$$

Bu ifodadan ko'rinishicha, elektromagnit quvvat P_{em} kuchlanish $\underline{U}$, EYK $\underline{E}_0$ va ular orasidagi siljish burchagi θ larga bog'liq bo'lar ekan. Kuchlanish $\underline{U}$ va EYK $\underline{E}_0$ vektorlar orasidagi θ burchak ***yuklanish burchagi*** deyiladi.

Noayon qutbli SG ning elektromagnit momenti quyidagi ifodadan topiladi:

$$M = P_{em} / \omega_1 = [(mU E_0 / (\omega_1 x_{sn})] \cdot \sin\theta, \qquad (23.5)$$

bu yerda: $\omega_1 = 2\pi n/60 = 2\pi f_1$ – magnit maydonining burchak tezligi. ω_1 =const bo'lgani uchun $M \sim P_{em}$ bo'ladi. 23.2,*b*-rasmda P_{em} (yoki M) = f(θ) bog'liqlik ko'rsatilgan bo'lib, unga SG elektromagnit quvvati yoki elektromagnit momentining ***burchak xarakteristikasi*** deyiladi.

Bunda U = const, f_1 = const va E_0 = const ($I_{qo'z}$ = const) bo'ladi. P_N va M_N larning qiymatlariga nominal burchak θ_N to'g'ri keladi va u $\theta_N = 20°\div35°$ oralig'ida bo'ladi. Burchak θ =π/2 bo'lsa, sinθ =1 bo'lib, quvvat va moment o'zlarining maksimum qiymatlariga ega bo'ladi.

$$P_{em\,max} = mUE_0 / x_{sn}, \quad M_{max} = mUE_0 /(\omega_1 x_{sn}). \quad (23.6)$$

Noayon qutbli SG burchak θ = 0÷π/2 oraliqda sinxron rejimda ishlay oladi. θ>π/2 da esa sinxronizmdan chiqib ketadi va avariya holati yuz beradi.

Ayon qutbli SG ning elektromagnit quvvatini vektor diagrammadan (23.2,*c*-rasm) foydalangan holda quyidagicha aniqlanadi. Magnit zanjirining to'yinishi hisobga olinmagan SG stator chulg'amining aktiv qarshiligi kichikligidan $r_1 \approx 0$ deb hisoblanadigan katta va o'rta quvvatli SG ning aktiv quvvati quyidagiga teng:

$$P \approx m \cdot U \cdot I_1 \cdot \cos\varphi. \qquad (23.7)$$

Vektor diagrammadan φ = ψ – θ ekanligini aniqlab (23.7) formulaga qo'yamiz:

$$P = m \cdot U \cdot I_1 \cdot \cos(\psi - \theta) = m \cdot U \cdot I_1 (\cos\psi \cdot \cos\theta + \sin\psi \cdot \sin\theta) =$$
$$= m \cdot U (I_q \cdot \cos\theta + I_d \cdot \sin\theta). \qquad (23.8)$$

Kuchlanish va kuchlanish pasayishi vektorlarini E_0 vektori yo'nalishiga (bunga mashinaning ko'ndalang "q" o'qi to'g'ri keladi) va unga perpendikular bo'lgan yo'nalish (mashinaning "d" o'qi)ga proeksiyalab quyidagi ifodalarga:

$$E_0 = U\cos\theta + I_d x_d\,;\, I_q x_q = U\sin\theta \qquad (23.9)$$

ega bo'lamiz, bulardan esa tokning ko'ndalang (I_q) va bo'ylama (I_d) tashkil etuvchilarini aniqlaymiz:

$$I_q = U\sin\theta / x_q\,,\;\; I_d = \left(E_0 - U\cos\theta\right)/ x_d\,. \qquad (23.10)$$

Toklarning bu qiymatlarini (23.8) ga qo'yib ayon qutbli sinxron mashinaning parametrlari orqali ifodalangan elektromagnit quvvatini hisoblash formulasini hosil qilamiz:

$$P_{em} = (mUE_0 / x_d)\cdot\sin\theta + (mU^2/2)\cdot\left(1/x_q - 1/x_d\right)\sin 2\theta\,. \quad (23.11)$$

(23.11) dan ko'rinishicha, quvvatning ***birinchi, ya'ni asosiy tashkil etuvchisi*** kuchlanishga va EYK E_0 ni hosil qiladigan qo'zg'atish chulg'amining magnit oqimiga bog'liq bo'ladi, ***ikkinchi tashkil etuvchisi esa*** mashinaning qo'zg'atish oqimiga bog'liq emas, ya'ni u kuchlanish kvadratiga va mashinaning bo'ylama va ko'ndalang o'qlari bo'yicha induktiv qarshiliklarining farqi ($x_d \neq x_q$, odatda $x_d > x_q$) tufayli hosil bo'ladi. Nominal qo'zg'atishda quvvatning ikkinchi tashkil etuvchisi birinchi (asosiy) tashkil etuvchi amplitudasining 20÷35% ini tashkil etadi.

Noayon qutbli sinxron mashinalarda $x_d = x_q$, shu sababli (23.11) formulada ikkinchi tashkil etuvchisi qatnashmaydi.

Sinxron mashinaning elektromagnit momenti. Buni aniqlash uchun elektromagnit quvvatni hisoblash formulasini magnit maydonning burchak tezligi ω_1 ga bo'lish kerak, masalan, ayon qutbli sinxron mashina uchun:

$$M = P_{em}/\omega_1 = [m\, U_1\, E_0 / (\omega_1\, x_d)]\cdot\sin\,\theta\; +$$

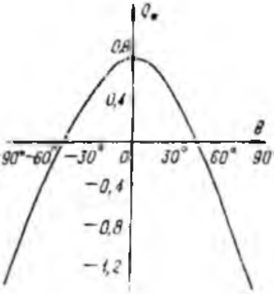
$$+ \{[m\, U_1^2 /(2\omega)]\left(1/x_q - 1/x_d\right)\}\cdot\sin\,2\,\theta. \qquad (23.12)$$

noayon qutbli sinxron mashinalar uchun esa 2-tashkil etuvchisi bo'lmaydi.

Sinxron mashina reaktiv quvvatining burchak xarakteristikasi.

U_1 = const, $I_{qo'z}$ = const shartlari bajarilganda olinadigan Q = *f* (θ) bog'liqlikka reaktiv quvvatning burchak xarakteristikasi deyiladi (23.3-rasm).

23.3-rasm. *Magnit to'yinishi hisobga olinmagan ayon qutbli o'ta qo'zg'atishli sinxron generator reaktiv quvvatining burchak xarakteristikasi ($E_* = 1,87$, $U_* = 1$, $x_d = 1,1$, $x_q = 0,75$).*



Ayon qutbli SG ning reaktiv quvvati quyidagi formuladan aniqlanadi:

$$Q = mU \cdot I \sin\varphi = (mUE_0 \cos\theta) / x_d +$$
$$+ (mU^2/2) \cdot (1/x_q - 1/x_d) \cos 2\theta - (mU^2/2) \cdot (1/x_q - 1/x_d). \quad (23.13)$$

Salt ishlashda ($\theta = 0$) reaktiv quvvat maksimal qiymatga erishadi:

$$Q_{max} = mU (E_0 - U) / x_d - mU^2 / (2x_q). \quad (23.14)$$

Agar $E_0 > U$ bo'lsa reaktiv quvvat $Q_{max} > 0$ bo'ladi, ya'ni sinxron generator reaktiv quvvatni elektr tarmog'iga beradi. Burchak θ ning oshishi bilan reaktiv quvvat kamaya boradi va burchak θ ning biror qiymatida quvvat ishorasini o'zgartiradi, ya'ni mashina elektr tarmog'idan reaktiv quvvatni ola boshlaydi.

23.3. Elektr tarmog'i bilan parallel ishlayotgan sinxron generatorning statik turg'unligi, sinxronlovchi quvvati va momenti

Statik turg'unlik tushunchasi. Sinxron mashinaning burchak xarakteristikasi statik turg'unlikni va ortiqcha yuklama bilan ishlay olish darajasini baholash uchun muhim ahamiyatga egadir. Elektr tarmog'i bilan parallel ishlayotgan sinxron mashinaning valiga qo'yilgan tashqi aylantiruvchi yoki tormozlovchi momentning kam miqdorda o'zgarishida sinxron (ya'ni $n = n_1$) aylanish chastotasini saqlay olish qobiliyatiga uning *statik turg'unligi* deyiladi. Statik turg'unlik faqat $M < M_{max}$ ga mos keladigan θ burchaklarda ta'minlanadi.

Agar $dM/d\theta > 0$ bo'lsa, sinxron mashina turg'un ishlab, $dM/d\theta < 0$ bo'lganda esa noturg'un ishlaydi; burchak θ qancha kichik bo'lsa mashina shuncha katta *turg'unlik zaxiraga* ega bo'ladi.

Sinxron generatorning sinxronlovchi quvvati va momenti. Elektr tarmog'i bilan parallel ishlayotgan SG ning normal ish rejimi buzilsa, uning sinxron ishlashini ta'minlovchi sinxronlovchi quvvat va moment

bo'lishi kerak, bu holda SG yuklanish burchagi θ ning ma'lum bir o'zgarish oralig'ida o'zining normal ishlashini saqlaydi. Demak, generatorga berilayotgan mexanik quvvat va uning elektromagnit quvvati orasidagi muvozanat buzilganda, generatorning sinxron ish rejimini tiklovchi quvvatga ***sinxronlovchi quvvat*** deyiladi.

Noayon qutbli mashinaning sinxronlovchi quvvati P_s ni aniqlash uchun elektromagnit quvvat P_{em} dan yuklanish burchagi θ bo'yicha hosila olinadi:

$$P_s = dP_{em} / d\theta = (mUE_0 / x_d)\cdot\cos\theta, \qquad (23.15)$$

sinxronlovchi moment esa

$$M_s = dM / d\theta = [mU\,E_0 /(\omega_1 x_{sn})]\cdot\cos\theta. \qquad (23.16)$$

Ayon qutbli sinxron mashina uchun sinxronlovchi quvvat

$$P_s = (mU\,E_0 / x_d)\cdot\cos\theta + [m\,U^2\,(1 / x_q - 1 / x_d)]\cdot\cos 2\theta, \quad (23.17)$$

sinxronlovchi moment esa

$$M_s = [\,mUE_0 / (\omega_1 x_d)]\cdot\cos\theta +$$
$$+[(m\,U^2 / \omega)\cdot(1 / x_q - 1 / x_d)]\cdot\cos 2\theta. \qquad (23.18)$$

$U_1=U_N$ va $I_{qo'z}=I_{qo'z.N}$ bo'lganda maksimal quvvat P_{max} ning nominal quvvat P_N ga nisbatiga sinxron mashinaning *ortiqcha yuklama bilan ishlash qobiliyati* deyiladi va $k_{o.yu}$ bilan belgilanadi:

$$k_{o.yu} = P_{max} / P_N = M_{max} / M_N\,. \qquad (23.19)$$

Noayon qutbli sinxron mashinalar uchun *ortiqcha yuklama bilan ishlash* qobiliyatini quyidagicha yozish mumkin $k_{o.yu} = 1 / \sin\theta_N$.

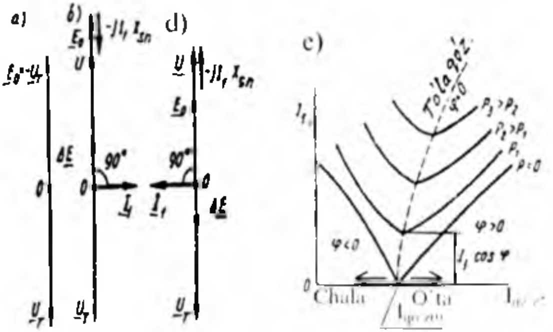
Standart bo'yicha quvvati 160 MW gacha bo'lgan turbogeneratorlar uchun $k_{o.yu}$=1,7; quvvati 500 MW gacha bo'lgan turbogeneratorlar uchun $k_{o.yu}$=1,6. Quvvati 800 MW gacha va undan katta quvvatli turbogeneratorlar uchun $k_{o.yu}$=1,5 ga tengdir. Standart bo'yicha gidrogeneratorlar uchun $k_{o.yu}$ =1,7 dan kichik bo'lmasligi kerak.

23.4. Sinxron generatorning reaktiv quvvatini rostlash va U-simon xarakteristikalari

Kuchlanish U = const, f_1 = const va quvvat P = const bo'lganda stator toki I_1 ning qo'zg'atish toki $I_{qo'z}$ ga bog'liqligini, ya'ni $I_1 = f(I_{qo'z})$ – sinxron mashinaning ***U-simon xarakteristikalari*** deyiladi.

Quyida elektr tarmog'i bilan parallel ulangan noayon qutbli SG ning salt ishlash (ya'ni P = 0) rejimini ko'rib chiqamiz.

Generatorni tarmoqqa ulagandan so'ngra uning EYK E_0 tarmoq kuchlanishi U_1 bilan muvozanatlashadi, ularning yig'indisi esa $\Delta U = E_0 + U_1 = 0$ bo'ladi (23.4,*a*-rasm). Bu holda yakor zanjiridagi tok ham nolga teng bo'ladi, ya'ni salt ishlaydi. Agar mashinaning qo'zg'atish toki oshirilsa (o'ta qo'zg'atishda), E_0 oshadi va $\Delta U = E_0 + U_1 > 0$ bo'ladi. Natijada yakor zanjirida I_1 tok hosil bo'ladi (23.4,*b*-rasm), bu tokning vektori EYK vektori E_0 dan 90° ga orqada qoladi. Bunda elektromagnit quvvatning aktiv tashkil etuvchisi $E_0 I \cos\psi = 0$ bo'ladi va generator faqat reaktiv quvvat ishlab chiqaradi va uni tarmoqqa beradi. Agar qo'zg'atish tokining qiymati oshirilsa reaktiv quvvatning qiymati oshadi, natijada EYK E_0 ham ortadi.



23.4-rasm. *Aktiv yuklama P = 0 bo'lganda, tarmoq bilan parallel ishlayotgan noayon qutbli sinxron generatorning oddiy vektor diagrammalari (**a**, **b**, **d**) va U-simion xarakteristikalari (**e**).*

Agar $E_0 = U_1$ bo'lgan holda (23.4,*d*-rasm) qo'zg'atish toki kamaytirilganda EYK E_0 ham kamayadi. Bu holda sinxron mashina chala qo'zg'atishli rejimda ishlaydi va teskari yo'nalishdagi kuchlanishlar farqi ΔU vujudga keladi. Shu sababli yakor toki I_1 kuchlanish U dan 90° ga orqada qolib, EYK E_0 dan esa $\psi = 90°$ oldinda keladi. Natijada reaktiv quvvat o'zining yo'nalishini o'zgartirib, tarmoqdan generatorga uzatiladi. Qo'zg'atish tokining keyingi kamaytirilgan qiymatlarida esa yakor toki I_1 ortadi.

Shunday qilib, *qo'zg'atish tokining o'zgarishi, reaktiv quvvatning o'zgarishiga olib keladi.* O'ta qo'zg'atish holatida ishlayotgan generator orqada qoluvchi tok, chala qo'zg'atish holatida esa oldinda keluvchi tok bilan ishlar ekan. 23.4,*e*-rasmda $I_1 = f(I_{qo'z})$ bog'liqlik, ya'ni *U-simon xarakteristikalari* ko'rsatilgan. Yuklanish rejimda U-simon xarakteristikalaridagi yakor tokining minimum qiymati $\cos\varphi = 1$ ga to'g'ri keladi. Generatorning tarmoqqa berayotgan aktiv quvvati P ortishi bilan U-

simon xarakteristika oldingi aktiv quvvatda olingan mazkur xarakteristikadan yuqoriroqda joylasha boradi (23.4-rasm), chunki aktiv quvvatning ortishi stator tokining aktiv tashkil etuvchisini oshiradi. Bunda yakor tokining minimum nuqtalari ($\cos\varphi=1$) o'ngga tomon siljiydi. Bunga sabab, aktiv quvvatning ortishi bilan stator toki aktiv tashkil etuvchisi I_{1a} ning ortishi tufayli statordagi $I_{1a}x_{sn}$ kuchlanish pasayishi ham ortadi. Tarmoq kuchlanish U_T = const bo'lganligidan yoki oshayotgan $I_a x_{sn}$ kuchlanish pasayishini qoplash uchun qo'zg'atish tokini oshirib EYK E_0 ni ham ko'paytirishga to'g'ri keladi, chunki $\underline{E}_0 = \underline{U}_1 + jI_{1a}x_{sa}$.

Nazorat savollari:

1. Uch fazali SG ni elektr tarmog'iga parallel ulash shartlari qanday bajariladi?

2. SG ni elektr tarmog'iga parallel ulashning qanday usullari mavjud?

3. Noayon va ayon qutbli SG larning elektromagnit quvvatlarini aniqlash formulalari vektor diagrammadan qanday aniqlanadi?

4. Ayon qutbli SG ning elektromagnit momentini tahlil qiling.

5. Ayon qutbli SG aktiv quvvatining burchak xarakteristikasini tahlil qiling.

6. SG ning U-simon xarakteristikalari va ularni tahlil qiling.

24-BOB. SINXRON MOTORLAR VA KOMPENSATORLAR

24.1. Sinxron motorlarga oid dastlabki ma'lumot va ishlash prinsipi

Dastlabki ma'lumot. Sinxron motorning tuzilishi umumiy holda sinxron generatorniki kabi (bunga oid ma'lumot 18.1-bobda keltirilgan) bo'lishiga qaramasdan, uning konstruksiyasida ayrim farqlar mavjuddir.

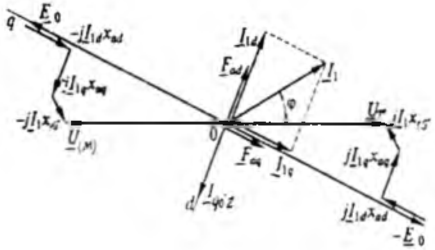
Sinxron mashinalar boshqa turdagi elektr mashinalari singari, qaytarlik xossaga ega, ya'ni ular generator rejimida ham, motor rejimida ham ishlashi mumkin. Lekin elektr sanoati sinxron mashinalarni aniq rejim uchun, ya'ni faqat generator rejimida yoki motor rejimida ishlash uchun mo'ljallab ishlab chiqaradi, chunki mashina ishining mazkur rejimlardagi o'ziga xos xususiyatlari uning konstruksiyasiga har xil talablar qo'yadi.

Sinxron motorlar asosan ayon qutbli ($2p = (6 \div 24)$ qilib tayyorlanadi; havo oralig'i generatornikiga nisbatan kamroq qilinadi (bunda uning ishga tushirish toki kamayadi); ishga tushirish jarayonidagi elektromagnit momenti generatorlar momentiga nisbatan katta bo'lishi uchun ularning ishga tushirish (dempfer) chulg'ami katta toklarga mo'ljallab hisoblanadi, chunki bu chulg'am sinxron motorni ishga tushirishda asosiy vazifani bajaradi.

Sinxron motorlar katta quvvatli nasoslarda, ventilatorlarda, havo haydagichlarda, kompressorlarda, sharli tegirmonlarda, prokat stanlarida va un tayyorlash tegirmonlarida foydalanish mumkin.

Ishlash prinsipi. Sinxron mashina motor rejimda ishlashi uchun uning stator chulg'amlariga uch fazali o'zgaruvchan tok, qo'zg'atish chulg'amiga esa o'zgarmas tok beriladi. Stator chulg'amida toklar vujudga keltirgan MYK lar aylanma magnit maydonni hosil qiladi. Bu maydon qo'zg'atish chulg'amidagi tok bilan ta'sirlashib aylantiruvchi momentni hosil qiladi va u rotorni aylantiradi. Demak, sinxron motorning stator chulg'amiga berilgan elektr energiya uning validagi mexanik energiyaga aylanar ekan.

Sinxron motorlarning vektor diagrammalarini qurishda tok fazasini tarmoq kuchlanishi U_1 ga nisbatan aniqlash qabul qilingan. Sinxron motor stator chulg'amiga berilgan kuchlanish $U_{(M)}$, tok I_1 va ular orasidagi vaqt bo'yicha siljish burchagi φ ma'lum bo'lganda vektor diagrammani qurish sinxron generatorniki kabi amalga oshiriladi (24.1-rasmning chap tomoni). Masalan, ayon qutbli motor uchun quyidagi



24.1-rasm. *Ayon qutbli sinxron motorning ota qo'zg'atishli rejim uchun vektor diagrammasi.*

tenglamaga asosan quriladi (bunda katta va o'rta quvvatli sinxron mashinalar uchun stator, ya'ni yakor chulg'amining aktiv qarshiligini $r_1 = 0$ deb qabul qilingan):

$$\underline{U}_{(M)} = \underline{E}_0 - j\underline{I}_{1d}x_{ad} - j\underline{I}_{1q}x_{aq} - j\underline{I}_1x_{1S}. \qquad (24.1)$$

Agar diagrammani tarmoq kuchlanishi U_T ma'lum bo'lganda qurilsa, unda (24.1) tenglama quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$\underline{U}_T = \underline{E}_0 + j\underline{I}_{1d}x_{ad} + j\underline{I}_{1q}x_{aq} + j\underline{I}_1x_{1S}. \qquad (24.2)$$

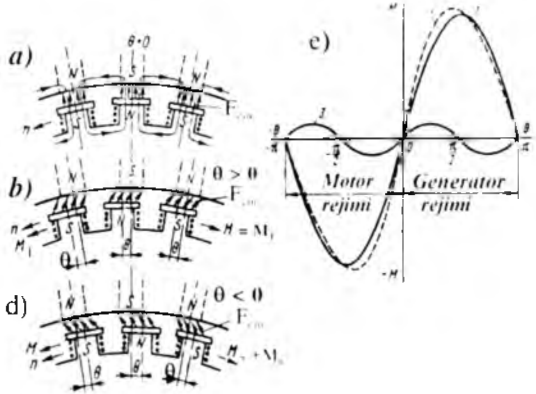
(24.1) va (24.2) tenglamalarga mos keluvchi vektor diagrammalar yakor toki kuchlanishdan oldin keladigan, ya'ni o'ta qo'zg'atishli rejimi uchun 24.1-rasmda ko'rsatilgan. Bundan ko'rinishicha, sinxron motorda yakorning bo'ylama reaksiyasi o'ta qo'zg'atishli rejimda magnitsizlovchi ta'sir qiladi (chunki MYK $\underline{F}_{ad}$ vektori qo'zg'atish MYK vektori $\underline{F}_{qo'z}$ ga teskari yo'nalgan). Shunga o'xshash holda ko'rsatish mumkinki, sinxron motorda kuchlanishdan vaqt bo'yicha orqada qoluvchi tokda yakorning bo'ylama reaksiyasi magnitlovchi ta'sir ko'rsatadi.

24.2. Sinxron motorning burchak va U-simon xarakteristikalari

Sinxron motor elektr tarmog'idan elektr quvvat P_1 ni iste'mol qiladi. Bu quvvatning bir qismi statorda yakor chulg'amidagi elektr isroflari P'_{e1} ni va stator po'lat o'zagidagi isroflar P'_{m1} ni qoplashga sarflanadi.

Elektr quvvati P_1 ning qolgan qismi magnit maydon vositasida rotorga uzatiladi. Bu quvvatga elektromagnit quvvat P_{em} deyiladi; uning bir qismi mexanik P'_{mex} va qo'shimcha $P'_{qo'sh}$ isroflarga sarflanadi, qolgan qismi esa valdagi foydali quvvat P_2 deyiladi.

Agar statordagi quvvat isroflari e'tiborga olinmay $P_1 = P_{em} = P$ deb qabul qilinsa, ayon qutbli sinxron motor uchun elektromagnit quvvatni SG niki kabi quyidagicha yozish mumkin:



24.2-rasm. *Qo'zg'atish chulg'ami magnit oqimi $\Phi_{qo'z}$ va stator chulg'ami natijaviy magnit oqimi Φ_{nat} larning sinxron mashina salt ishlashida (**a**), generator (**b**) va motor (**d**) rejimlarida o'zaro ta'siri natijasida burchak q ning hosil bo'lishi hamda motor va generator rejimlari uchun burchak xarakteristikalari.*

$$P = (mUE_0/x_d)\cdot\sin(-\theta) + (mU^2/2)\cdot(1/x_q - 1/x_d)\cdot\sin(-2\theta) = \\ = P' + P''. \quad (24.3)$$

Noayon qutbli sinxron motorda $x_d = x_q$ bo'lgani sababli P' tashkil etuvchisi bo'lmaydi, ya'ni:

$$P = (mUE_0/x_d)\cdot\sin\theta. \quad (24.4)$$

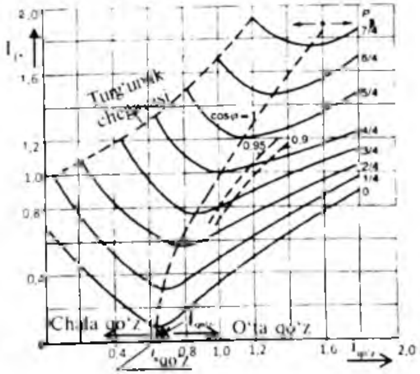
Agar (24.3) ni $\omega_1 = 2\pi n_1/60$ ga bo'lsak, u holda elektromagnit momentning formulasiga ega bo'lamiz. *Ayon qutbli sinxron motor uchun*:

$$M = [m\cdot U\cdot E_0/(\omega_1\cdot x_d)]\cdot\sin(-\theta) + [m\cdot U^2/(2\omega_1)\cdot(1/x_q - \\ - 1/x_d)]\cdot\sin(-2\theta) = M'+M''. \quad (24.5)$$

Noayon qutbli sinxron motor uchun:

$$M=[m\cdot U\cdot E_0/(\omega\cdot x_d)]\cdot\sin(-\theta). \quad (24.6)$$

24.2,*d*-rasmda U_1 = const, f_1 =const va $I_{qo'z}$ = const bo'lganda $M=f(\theta)$ bog'liqlik, ya'ni ayon qutbli sinxron mashina elektromagnit



24.3-rasm. *Sinxron motorning U-simon xarakteristikalari (bunda: $I_{1(0)a}$ va $I_{qo'z.0}$ – tegishlicha aktiv quvvat P_1=0 va EYK E_{1u} = U_1 bo'lgandagi salt ishlash isroflarini qoplash uchun zarur bo'lgan salt ishlash tokining aktiv tashkil etuvchisi va qo'zg'atish tokining qiymati.*

momentining burchak xarakteristikasi ko'rsatilgan. Bunda motor rejimida yuklanish burchagi θ ning ishorasi manfiy bo'ladi, chunki musbat ishora generator rejimi uchun qabul qilingan.

Sinxron motorda elektromagnit moment stator magnit maydoni yo'nalishiga mos bo'lsa (24.2,*b*-rasm), sinxron generatorda esa u momentning yo'nalishi stator magnit maydoni yo'nalishiga teskari bo'ladi (24.2,*b*-rasm).

Ayon qutbli sinxron motorda qo'zg'atish toki $I_{qo'z} = 0$ (demak, $E_0 = 0$) bo'lsa ham M' tashkil etuvchi hisobiga elektromagnit moment mavjud bo'ladi.

Tarmoq kuchlanishi $U_t = U_N$ = const va valdagi quvvat P_2 = const chastota $f = f_N$ = const bo'lganda yakor toki I_1 ning qo'zg'atish toki $I_{qo'z}$ ga bog'liqligi – $I_1 = f(I_{qo'z})$ ni xarakterlovchi egri chiziq larga motorning ***U-simon xarakteristikalari*** deyiladi (24.3-rasm).

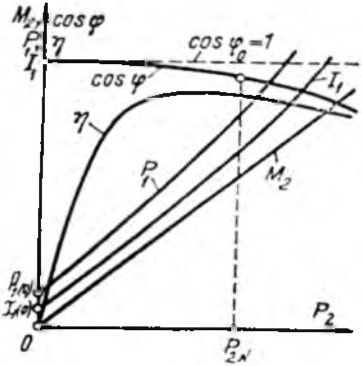
Qo'zg'atish tokining nominal qiymati $I_{qo'z.N}$ dan chap tomoni chala qo'zg'atish ($E_0 < U_t$) va o'ng tomoni esa o'ta qo'zg'atish ($E_0 > U_t$) hisoblanadi, yakor tokining minimum nuqtalarida esa cosφ = 1 bo'ladi.

O'ta qo'zg'atishlida sinxron motor elektr tarmog'iga reaktiv quvvat beradi, natijada tarmoqning yuklama ulangan qismida cosφ ning oshishiga yordam beradi. Undan tashqari, reaktiv quvvat iste'molining kamayishi elektr stansiyalardagi SG lar ishlab chiqarayotgan reaktiv quvvatni, elektr uzatish liniyalarida tok va isroflarni kamaytirishga imkon beradi. Shu sababli sinxron motorlarni nominal quvvatda o'ta qo'zg'atish va $\cos\varphi_N = 0{,}9$ bilan ishlash uchun loyihalanadi.

U-simon xarakteristikalardagi AB punktir chiziq (24.3-rasm) sinxron motorning *statik turg'unlik chegarasi* hisoblanadi, bunda yuklanish burchagi $\theta = \theta_{kr}$ bo'ladi. Sinxron motorning salt ishlashi (ya'ni P = 0) dagi U-simon xarakteristikaning minimal nuqtasi absissalar o'qigacha yetib kelmaydi (sinxron generatorniki esa yetib keladi).

24.3. Sinxron motorning ish xarakteristikalari

U_1 = const, f_1 = const va $I_{qo'z}$ = const bo'lganda sinxron motorning validagi foydali moment M_2, elektr tarmog'idan iste'mol qiladigan quvvati P_1, stator chulg'amining toki I_1, FIK η va quvvat koeffitsienti cosφ larning motor validagi foydali quvvatga bog'liq holda o'zgarishi, ya'ni M_2, P_1, I_1, η, cosφ = $f(P_2)$ bog'liqlikka sinxron motorning ***ish xarakteristikalari*** deyiladi. Bu xarakteristikalar valdagi yuk P_2 ni noldan nominalgacha o'zgartirib tekshiriladi (24.4-rasm).



24.4-rasm. *Sinxron motorning xarakteristikalari.*

Motorning aylanish chastotasi *n* stator chulg'amidagi tok chastotasi o'zgarmas bo'lganda $n = n_1 = 60\ f_1/p = \text{const}$ bo'lgani uchun $n = f(P_2)$ bog'liqlik absissalar o'qiga parallel bo'lgan to'g'ri chiziqli ko'rinishga ega bo'ladi. $P_1 = f(P_2)$ bog'lanish yuqoriga biroz egilgan ko'rinishda bo'ladi, chunki P_1 quvvat yakor tokining kvadrati (I_1^2) ga mutanosib bo'ladi. $I_1 = f(P_2)$ bog'lanish P_1 ning oshishi bilan o'sadi, chunki $I_1 = P_1/(m \cdot U_1 \cos\varphi)$.

FIK ning yuklamaga nisbatan o'zgarishi $\eta = f(P_2)$ hamma elektr mashinalari uchun umumiy xarakterga ega, ya'ni sinxron motorning o'zgaruvchan va o'zgarmas isroflari teng bo'lganda FIK maksimal qiymatga erishadi. Bu qiymatdan chap tomonida magnit isroflari elektr isroflardan katta bo'lib, o'ng tomonida esa stator chulg'amidagi elektr isroflar magnit isroflardan ko'p bo'ladi.

Sinxron motorlarning asinxron motorlarga nisbatan *afzalliklari* va *kamchiliklariga* quyidagilar kiradi.

Afzalliklari: Sinxron motorning $\cos\varphi = 1$ da ishlay olishi tarmoqning quvvat koeffitsientini yaxshilaydi; motorning o'lchamlari kichiklashadi, chunki sinxron motorning toki shunday quvvatli asinxron motornikiga nisbatan kamligi motorning o'lchamlarini qisqartirishga imkon yaratadi; sinxron motor maksimal momentining kuchlanishga to'g'ri mutanosibligi tufayli mazkur motor kuchlanishning o'zgarishini kam sezadi; valdagi yuklamaning me'yoriy qiymatlarida qanday bo'lishidan qat'iy nazar sinxron motorning aylanish chastotasi o'zgarmas bo'ladi.

Kamchiliklari: konstruksiyasining murakkabligi; ishga tushirishning va aylanish chastotasini rostlashning murakkabligi; qo'zg'atish

chulg'amini o'zgarmas tok bilan ta'minlash uchun qo'zg'atgich yoki boshqa qurilmalarning talab etilishi; asinxron motorga nisbatan narxining qimmatligi; cho'tka-halqa qismining mavjudligi tufayli ishonchlilikning nisbatan kamligi ularning kamchiliklari hisoblanadi.

24.4. Sinxron motorlarni ishga tushirish usullari

Sinxron motorning elektromagnit momenti stator va rotor magnit maydonlari ta'sirlashishi natijasida hosil bo'lib, rotorining va stator magnit maydonining aylanish chastotalari sinxron bo'lsa, elektromagnit moment o'zining ishorasini o'zgartirmaydi.

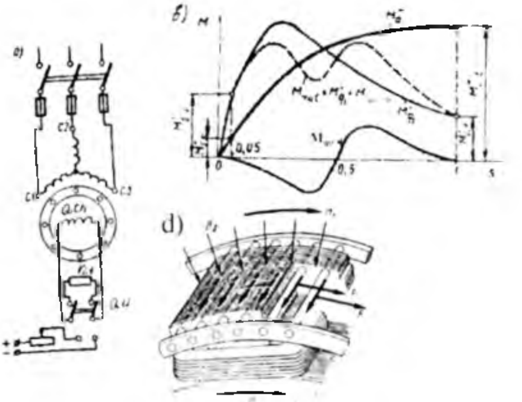
Agarda sinxron motorning stator chulg'ami bevosita tarmoqqa ulansa, motor ishga tushib keta olmaydi, chunki rotori qo'zg'almas bo'lganda stator magnit maydonining qutblari yarim davrda rotorning bir xil qutblari bilan, davrning qolgan yarmida rotorning boshqa qutblari bilan ta'sirlashadi. Buning oqibatda momentning ishorasi o'zgaradi, hamda rotorning mexanik inersiyasi hisobiga moment rotorni yarim davrda aylantirib yubora olmaydi. Sinxron motorni ishga tushirishning quyidagi usullari mavjud: yordamchi motor vositasida, tok chastotasini o'zgartirish yo'li bilan va asinxron usulda ishga tushirish. Bu usullardan *eng ko'p qo'llaniladigani asinxron usulda* ishga tushirishdir.

Yordamchi motor vositasida ishga tushirish. Dastlab sinxron motorning rotori $n \approx n_N$ ga yaqin aylanish chastota bilan yordamchi motor vositasida aylantiriladi. Bunda qo'zg'atish chulg'ami o'zgarmas tok manbayiga ulangan, stator chulg'ami esa ochiq bo'lib, sinxron motor *salt ishlayotgan* generator rejimida ishlaydi. So'ngra generator parallel ulash shartlari bajarilgan holda tarmoqqa parallel ulanadi. Shundan so'ng yordamchi motor ajratiladi va sinxron generator motor rejimiga o'tadi. Yordamchi motor sifatida odatda qutblar soni sinxron motornikidan ikkita kam bo'lgan faza rotorli asinxron motor qo'llaniladi (bu holda sinxron motorning aylanish chastotasini sinxron chastotagacha yetkazish mumkin) va uning quvvati sinxron motor quvvatining $10 \div 20$ % ini tashkil etadi.

Tok chastotasini o'zgartirish yo'li bilan ishga tushirish. Bu usul chastota o'zgartgich qurilmasi bo'lgan sharoitda amalga oshirilishi mumkin. Bunday chastota o'zgartgich yordamida kuchlanish chastotasi noldan nominal qiymatgacha oshirib boriladi, natijada stator magnit maydonining aylanish chastotasi ham oshib boradi. Rotor esa aylanma magnit maydoni yo'nalishi bo'yicha nominal chastota bilan aylanadi.

Asinxron usulda ishga tushirish. Bu usul bilan sinxron motorni ishga tushirish uchun rotor qutblari uchliklarida ishga tushirish chulg'ami o'rnatilgan bo'lishi lozim. Bu chulg'am asinxron motorning qisqa tutashtirilgan chulg'amiga o'xshagan bo'ladi.

Sinxron motorni asinxron usulda ishga tushirish sxemasi 24.5,*a*-rasmda keltirilgan. Stator chulg'ami uch fazali tok manbayiga ulanganda undan uch fazali tok o'tib, statorda aylanma magnit maydon hosil bo'ladi. Bu maydon rotordagi ishga tushirish chulg'amini kesib o'tib, unda EYK va tok hosil qiladi. Ishga tushirish chulg'amidagi tok aylanma magnit maydon bilan ta'sirlashib elektromagnit kuch (24.5,*d*-rasm) va aylantiruvchi momentni hosil qilad



24.5-rasm. *Sinxron motorni:* ***a*** *– asinxron usulda ishga tushirish sxemasi va* ***b*** *– ishga tushirishdagi asinxron momentlar, bunda:* M_a *– asosiy moment;* $M_{qo'sh}$ *– qo'zg'atish chulg'ami konturida bir o'qli effekt tufayli vujudga keladigan qo'shimcha moment;* M_{sk} *– sinxronizmga kiritish momenti;* M_{it} *– ishga tushirish momenti;* F_{em} *– ishga tushirish chulg'ami sterjenlaridagi elektromagnit kuchlar;* ***QCh*** *– qo'zg'atish chulg'ami;* ***QU*** *– qayta ulagich;* r_{it} *– asinxron usulda ishga tushirishda qo'zg'atish chulg'amiga ulanadigan aktiv qarshilik; d – demifer cho'lg'am.*

Agar $M_{em} > M_1$ bo'lsa rotor aylana boshlaydi, rotorning aylanish chastotasi stator aylanma magnit maydonining sinxron aylanish chastotasiga yaqinlashganda ($n=0{,}95 \cdot n_1$) qo'zg'atish chulg'amiga o'zgarmas tok beriladi. Bu tok sinxronlovchi moment M_s ni hosil qiladi. Shu moment ta'sirida motor sinxron aylanish chastota bilan ishlay boshlaydi.

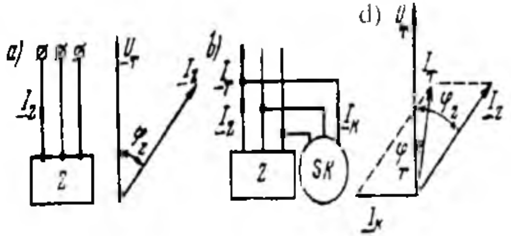
Ishga tushirish vaqtida qo'zg'atish chulg'amini ochiq qoldirib bo'lmaydi, chunki statorning aylanma magnit maydoni o'ramlar soni ko'p bo'lgan qo'zg'atish chulg'amida uning izolatsiyasi va sinxron motorni ishga tushiruvchilar uchun juda xavfli bo'lgan katta qiymatli EYK hosil qiladi. Shuning uchun sinxron motorni ishga tushirishda uning qo'zg'atish chulg'ami o'z qarshiligidan taxminan 10 marta katta bo'lgan aktiv qarshilik ($r_n \approx 10\, r_{qo'z}$) ka ulangan bo'lishi lozim.

Qo'zg'atish chulg'amini qisqa tutashtirish ham mumkin emas, chunki bu holda u nosimmetrik bo'lgan bir fazali konturni hosil qiladi. Bu kontur qo'shimcha momentni hosil qilib, sinxron motorning mexanik xarakteristikasida aylanish chastotasining $n = n_s/2$ ga yaqin qiymatida aylantiruvchi momentning kamayishiga olib keladi (24.5,*b*-rasm). Buning oqibatida rotor aylanish chastotasi sinxron qiymatigacha yeta olmasligi ham mumkin.

Agar sinxron motor ulanadigan tarmoqning quvvati nisbatan kam bo'lsa, motorni asinxron usul bilan ishga tushirishda ishga tushirish tokining ta'siridan tarmoqda juda katta kuchlanish pasayishi hosil bo'ladi. Bunday holda ishga tushirish tokini kamaytirish uchun sinxron motor tarmoqqa avtotransformator, reaktor yoki tokni cheklaydigan boshqa qurilmalar yordamida ulanadi.

24.5. Sinxron kompensator va uning elektr ta'minoti sistemasida quvvat koeffitsienti cosφ ni yaxshilashi

Sinxron kompensator elektr ta'minoti sistemasida reaktiv quvvatni rostlovchi sinxron mashina bo'lib, u asosan asinxron motorlar va transformatorlar tarmoqdan oladigan reaktiv quvvatni kompensatsiyalash uchun xizmat qiladi. Valida mexanik yuklamasi bo'lmagan salt ishlayotgan sinxron motorga ***sinxron kompensator*** deyiladi. Uning qo'zg'atish toki nominal qiymatdan katta bo'lganda elektr tarmog'iga kuchlanishdan oldinda keluvchi reaktiv tok beradi va elektr tarmog'ining quvvat koeffitsienti cosφ ni oshiradi (24.6-rasm). Elektr energiyasi uzoq masofaga uzatilganda elektr uzatish liniyasida induktiv yuklama katta bo'lganligi uchun liniya oxirida kuchlanish ancha pasayadi, yuklama kamayganda esa liniyaning sig'im qarshiligi ta'sirida kuchlanish nominal qiymatdan ancha katta bo'ladi.



24.6-rasm. *Quvvat koeffitsientini oshirish uchun sinxron kompensatorning ishlatilishi.*

Liniyaning yuklamasi katta bo'lganda sinxron kompensator kattaroq qo'zg'atish toki bilan, yuklama kamayganda esa kichikroq qo'zg'atish toki bilan ishlab elektr tarmog'ining oxirida kuchlanishni U_T = const bo'lishini ta'minlaydi. Bunda qo'zg'atish toki avtomatik usulda rostlab turiladi. Demak, sinxron konpensatorlar kuchlanishning o'zgarmas holda qolishini ta'minlash uchun ham ishlatilar ekan. Bunda tarmoqdan o'tuvchi reaktiv tokning qiymati kamayadi, bu esa quvvat isrofini kamaytiradi.

Sinxron kompensator induktiv (orqada qoluvchi) tokining eng katta qiymati qo'zg'atish toki nolga teng bo'lganga to'g'ri keladi, sig'imiy (oldinda keluvchi) tokining me'yoriy qiymati kompensator aktiv qismlarining qizishi bilan chegaralanadi. Odatda, oldinda keluvchi tokning keyinda keluvchi tokka nisbati 1,5÷2 bo'ladi. Kompensatorning quvvati eng katta oldinda keluvchi tok bilan aniqlanadi. Sinxron kompensatorlarda θ burchagi nolga yaqin bo'ladi, rotorlari ayon qutbli, aylanish chastotasi esa 750÷1000 ayl/min bo'ladi.

Sinxron kompensatorlarda ham sinxron motorlarga o'xshagan ishga tushirish chulg'ami bo'lib, u qutblar uchida joylashgan bo'ladi va asinxron usulda ishga tushiriladi. Yuklama momenti nolga teng bo'lgani uchun sinxron kompensatorlarning ishga tushirilishi yengil kechadi.

Sinxron kompensatorning U-simon xarakteristikasi asosiy ish xarakteristikasi hisoblanadi. Bu xarakteristika sinxron motorning R = 0 dagi U-simon xarakteristikasi kabi bo'ladi-yu, lekin uning minimum nuqtasidagi tokning aktiv tashkil etuvchisi $I_{1(0)a}$ 24.3-rasmdagiga nisbatan kamroq bo'ladi. Bunga sabab, rotor konstruksiyasining sinxron motornikidan quyidagilar bilan farqidir, ya'ni: valining yuklama ulash uchun chiqib turadigan qismi bo'lmasligi, undan tashqari, valning diametri nisbatan kamroq qilib tayyorlanishi; sinxron kompensatordan o'ta yuklanish qobiliyati talab qilinmaganligidan uning maksimal momenti M_{max} ni havo oralig'ini kamaytirish hisobiga pasaytirilishi

(bunda x_d oshadi), bu esa, qo'zg'atish chulg'ami o'lchamlarini kamaytirishga imkon beradi. Bularning hammasi sinxron kompensator gabaritlarini kamaytirishga olib keladi.

Sinxron kompensator ishlab chiqaradigan reaktiv quvvatining qiymati qo'zg'atish tokiga bog'liq bo'ladi. O'ta qo'zg'atish rejimida ishlayotgan kompensator tarmoq kuchlanishidan oldinda keluvchi tok bilan ishlab, tarmoqqa reaktiv quvvatni beradi. Chala qo'zg'atish rejimida esa esa tarmoq kuchlanishidan orqada qoluvchi tok bilan ishlab, tarmoqdan reaktiv quvvatni iste'mol qiladi. Liniyaning quvvat koeffitsienti cosφ ni oshirish uchun sinxron kompensator o'ta qo'zg'atish rejimida ishlashi kerak. Qo'zg'atish toki $I_{qo'z}$ shunday rostlanishi kerakki, bunda yakor toki I_1 tarmoq kuchlanishi U_1 dan 90° oldinda kelishi va yuklama toki I_{yu} ning reaktiv tashkil etuvchisi $I_{yu.r}$ ga teng bo'lishi kerak, natijada tarmoq faqat yuklama tokining aktiv tashkil etuvchisi bilan yuklanadi, ya'ni $I_1 = I_{yu.a}$. Tarmoq kuchlanishini U_T = const qilib turish uchun, sinxron kompensatorning EYK $E_0 = U_1$ bo'lishi lozim.

Agar tarmoq kuchlanishi sinxron kompensator ulangan joyda nominal qiymatidan katta, ya'ni $U_1 > U_{1N}$ bo'lsa, u holda sinxron kompensator tarmoqni orqada qoluvchi reaktiv tok bilan yuklaydi. Sinxron kompensatorning quvvati katta bo'lsa, tarmoq kuchlanishining tebranishi 0,5 ÷ 1% dan oshmaydi.

Sinxron kompensatorlar asosan ayon qutbli mashina bo'lib, quvvati 2,8 MV·A dan 160 MV·A gacha, aylanish chastotasi esa 750 ayl/min yoki 1000 ayl/min bo'ladi. Ta'kidlash lozimki, so'nggi vaqtlarda MDH mamlakatlarida (Rossiya, Ukraina) rotorining konstruksiyasi noayon qutbli sinxron mashina (turbogenerator) asosida quvvati 320 MV·A bo'lgan bo'ylama-ko'ndalang qo'zg'atishli kompensator ishlab chiqilgan va samarali ishlatilmoqda.

Nazorat savollari:

1. Sinxron motorning tuzilishi va ishlash prinsipini so'zlab bering.

2. Sinxron motorni qanday ishga tushirish usullarini bilasiz?

3. Sinxron motorning ish xarakteristikalarini tushuntirib bering.

4. Sinxron motorning burchak va U-simon xarakteristikalarini tahlil qiling.

25-BOB. SINXRON MASHINALARNING ISTIQBOLLI TURLARI

25.1. Dastlabki ma'lumot

Krioturbogenerator. Uning rotori suyuqlangan geliy bilan sovitilgan kriostatdan iborat bo'ladi. Qo'zg'atish chulg'amida tok zichligi 100 A/ mm^2 mashinaning havo oralig'idagi induksiya esa 1,3÷1,5 T ga yetadi. Bunday induksiyalarda kriogenerator statori tishsiz qilib tayyorlanadi. Stator chulg'ami suv bilan sovitiladi. Krioturbogeneratorlar hozirgi vaqtda ishlab chiqarish bosqichida tajriba sinovlaridan o'tkazilmoqda.

Asinxronlashtirilgan turbogeneratorlar (ASTG). Turbogeneratorlarning quvvati oshgan sari ularning parametrlari yomonlasha boradi; bu hol esa energetika sistemasining ekspluatatsiya shartlariga salbiy ta'sir ko'rsatadi. Reaktiv qarshiliklar qiymatlarining oshishi, generatorlarning inersiya momentlarining kamayishi, hamda elektr uzatish liniyalari (EUL) uzunligining va ular orqali uzatiladigan quvvatlarning oshishi elektr sistemalarining *dinamik turg'unligini pasaytiradi*. Energetika sistemasida aktiv yuklamaning kamaygan soatlarida ortiqcha reaktiv quvvatning hosil bo'lishi EUL da me'yordan ortiq kuchlanishning oshishi vujudga keladi. Sinxron generatorlar katta qiymatli reaktiv quvvatni iste'mol qilish rejimida, hatto kuchli ta'sir qiluvchi regulatorlar bo'lganda ham turg'un ishlay olish qobiliyatiga ega emaslar.

Agar EUL da *magnitlanish o'qi buriladigan* sinxron turbogeneratorlar (shu jumladan, ASTG lar) qo'llanilsa, yuqorida ko'rsatilgan muammolarni yechishda katta ijobiy natijalar olinadi. ASTG ning odatdagi sinxron generatordan farqi shuki, uning rotorida biri-biridan fazoda 90° burchakka siljigan ikki fazali qo'zg'atish chulg'ami joylashtirilgan bo'lib, ular boshqariladigan statik o'zgartgichga ulanadi. Ikki fazaga alohida o'zgarmas tok berib ishlatilsa, ASTG odatdagi sinxron rejimda ishlaydi. Bunday rejimda ishlaydigan sinxron generatorlarni *ikki o'qi bo'yicha qo'zg'atishli* yoki *bo'ylama-ko'ndalang qo'zg'atishli* sinxron mashinalar deyiladi.

25.2. Magnitlanish o'qi buriladigan sinxron mashinalar

Bo'ylama-ko'ndalang qo'zg'atishli sinxron mashinalar. Bunday sinxron mashinalarning stator tuzilishi an'anaviy sinxron mashinalarnikidan farq qilmaydi. Sinxron mashina rotoridagi tinchlantiruvchi (generator rejimida) yoki ishga tushirish chulg'ami

(motor rejimida) o'rniga ikki yoki *m* fazali qo'zg'atish chulg'ami joylashtiriladi. Quyida ikki fazali, chulg'ami bo'lgan noayon va ayon qutbli rotorning tuzilishini ko'rib o'tamiz. Bo'ylama va ko'ndalang o'qlari bo'yicha qo'zg'atiladigan sinxron mashinaning rotori *noayon qutbli* bo'lsa, simmetrik ikki fazali qo'zg'atish chulg'ami rotor pazlariga xuddi yakor chulg'ami yoki faza rotorli asinxron motorning rotor chulg'ami kabi o'ralgan bo'ladi. Agar ikki chulg'am «ax» va «by» lar har xil bo'lsa, ya'ni nosimmetrik bo'lsa, ular har xil hajmni egallaydi. 25.1,*a*-rasmda «ax» chulg'am umumiy pazlarning 3/4 qismini, "by" chulg'am esa 1/4 qismini egallagan bir qatlamli noayon qutbli rotorning chulg'amlari ko'rsatilgan.

Noayon qutbli bo'ylama va ko'ndalang o'qlari bo'yicha qo'zg'atiladigan sinxron mashinalarda bo'ylama o'qi «ax» qo'zg'atish chulg'amining o'qi bo'yicha yo'nalgan bo'lib, uning musbat yo'nalishi «ax» chulg'amning magnit oqimi bilan bir xilda yo'nalgan bo'ladi. Ko'ndalang o'q "q" esa «by» qo'zg'atish chulg'ami o'qi bo'yicha yo'nalgan bo'ladi. Shu sababli «ax» qo'zg'atish chulg'amini – ***bo'ylama***, «by» qo'zg'atish chulg'amini esa ***ko'ndalang qo'zg'atish chulg'amlari*** deyiladi.

Bo'ylama-ko'ndalang o'qlari bo'yicha qo'zg'atiladigan sinxron mashinaning rotori ayon qutbli bo'lsa, u holda qo'zg'atish chulg'amlari «ax» va «by» larni bir xil, ya'ni simmetrik qilish mumkin emas.

Asosiy bo'ylama qo'zg'atish chulg'ami «ax» xuddi oddiy sinxron mashinalardagi qo'zg'atish chulg'ami kabi joylashtiriladi, qo'shimcha ko'ndalang chulg'ami «by» esa dempferlovchi (motor rejimida "ishga tushiruvchi") chulg'am o'rnida joylashtiriladi (25.1,*b*-rasm) va bu

25.1-rasm. *Qo'zg'atish chulg'amlari «ax» va «by» har xil bo'lgan noayon qutbli rotor (**a**), dempfer chulg'ami o'rniga ko'ndalang qo'zg'atish chulg'ami joylashtirilgan 8 qutbli (**b**) va 4 qutbli (**d**) ayon qutbli rotorlar (4 qutbli modelda: bo'ylama (2) va ko'ndalang (3) qo'zg'atish chulg'amlari; **4** va **1** – mos ravishda ularga tegishli kontakt halqalar hamda majburiy va erkin tebranishlar chastotalari* $w_{maj} \approx w_{erk}$ *bo'lgandagi yuklanish burchagi q ning tebranishlarini rostlash natijalari (e).*

chulg'amning MYK asosiy chulg'am MYK ning 15÷20 % ni tashkil etishi mumkin.

Bunday sinxron mashinalarning *ishlash prinsipi* oddiy sinxron mashinanikidan farq qilmaydi, faqatgina o'tish jarayonlar vaqtida ko'ndalang qo'zg'atish chulg'ami «by» ishga tushiriladi. Ikkala qo'zg'atish chulg'amiga ham o'zgarmas tok manbasidan kuchlanish beriladi. Bu mashinalar motor, generator, sinxron kompensator rejimlarida ishlashi mumkin. Bo'ylama-ko'ndalang o'qlari bo'yicha qo'zg'atiladigan sinxron mashinalarning ekspluatatsion xarakteristikalari ***magnitlanish o'qi burilishi tufayli*** an'anaviy sinxron mashinalarnikidan afzal bo'ladi, chunki yakor reaksiyasining ta'siri ko'ndalang qo'zg'atish chulg'ami MYK tomonidan kompensatsiyalanadi. Natijada, qo'shimcha ko'ndalang qo'zg'atish chulg'ami MYK ning ijobiy ta'siri tufayli mashinaning statik va dinamik turg'unligi oshadi, erkin va majburiy tebranishlar chastotalari tenglashgan holda rezonans hodisalaridagi mashina parametrlarining katta amplituda bilan tebranishlarini (25.1,*e*-rasm) so'ndirish imkoni tug'iladi*.

Bu rasmda: ***1*** — tebranishlar so'ndirilmagan hol; ***2*** — faqat bo'ylama o'qi bo'yicha rostlanganda burchak θ ning tebranishlari nisbatan kamayadi, lekin to'la so'ndirib bo'lmaydi; $U_{qo'z(f)d}$ = const bo'lib, ko'ndalang qo'zg'atish MYK bilan rostlashda esa (***3***) mazkur tebranishlarni deyarli to'la so'ndirish imkoniyati bo'ladi hamda mashinani boshqarish yaxshilanadi.

Hozirgi vaqtda Ukrainada Rossiya hamkorligida quvvati 320 MV·A bo'lgan bo'ylama-ko'ndalang qo'zg'atishli noayon qutbli sinxron kompensator ishlab chiqarilgan va samarali ishlatilmoqda.

Asinxronlashtirilgan sinxron mashinalar. Agar sinxron mashinada bir-biriga perpendikular bo'lgan ikkita qo'zg'atish chulg'ami bo'lib, ularga ikki fazali o'zgaruvchan kam chastotali kuchlanish manbayi ulansa, u holda bu chulg'amlardan sinusoidal toklar o'tadi va qo'zg'atish chulg'amida magnitlanish o'qi buriladigan MYK va aylanma magnit maydonini hosil qiladi. Bu maydon rotorga nisbatan kam qiymatli sirpanish bilan aylanadi.

Shu sababli, bunday mashinalarni ***asinxronlashtirilgan sinxron***

---

* ***Салимов Д.С.*** *О некоторых режимах работы явнополюсных синхронных машин продольно-поперечного возбуждения с учетом насыщения. — Изв. АН УзССР, СТН, 1981, № 6.*

mashinalar deyiladi. Bunday mashinalarning tuzilishi va ishlash prinsipi bo'ylama va ko'ndalang o'qlari bo'yicha qo'zg'atiladigan sinxron mashinalarniki kabi bo'ladi, ammo qo'zg'atish chulg'amlariga barqaror ish jarayonida o'zgarmas tok berilsa, o'tish jarayonlarda esa bu chulg'amlarga o'zgaruvchan chastotali kuchlanish beriladi. Bu mashinalar ham motor, generator va sinxron kompensator rejimlarida ishlashi mumkin.

Bu mashinalarning xarakteristikalari (sinxron ish rejimida) va ko'ndalang qo'zg'atish chulg'amining roli ham xuddi bo'ylama-ko'ndalang o'qlari bo'yicha qo'zg'atiladigan mashinalarniki kabi bo'ladi.

Hozirgi vaqtda Ukrainaning Burshtinsk IES da ikkita 200 MW li ikki o'qi bo'yicha qo'zg'atishli asinxronlashtirilgan turbogenerator ishlab turibdi. Ta'kidlash lozimki, Rossiyada Ukraina bilan hamkorlikda quvvati 800 MW bo'lgan asinxronlashtirilgan turbogeneratorning loyihasi ustida ham ishlar olib borilmoqda.

25.3. O'ta o'tkazuvchan qo'zg'atish chulg'amli sinxron mashinalar

Hozirgi vaqtda qo'zg'atish chulg'amlari o'ta o'tkazuvchan materiallardan tayyorlangan sinxron mashinalarga bo'lgan qiziqish oshib bormoqda. Ayrim metallar absolut nul temperaturada o'ta o'tkazuvchanlik kuzatiladi. O'ta o'tkazgichlarning qarshiligi amaliy jihatdan nulga teng. Bu holda ma'lum bir kritik temperatura va magnit induksiya hamda kritik tok zichligi saqlanadi. Hozirgi vaqtda sanoat maqsadlari uchun niobiy va titan yoki niobiy va qalay qotishmalaridan tayyorlangan o'ta o'tkazuvchan materiallar foydalanilmoqda*.

Bunday o'tkazuvchan materiallar uchun kritik temperaturaning qiymati $4{,}2 \div 5$ K, kritik tok zichligi 1000 A/mm^2, kritik magnit induksiyasi $4 \div 7$ T ga teng.

Elektr mashinalari chulg'amlari uchun o'ta o'tkazuvchan materiallarni qo'llash kichik kesim yuzasidan juda katta tok o'tkazib kuchli magnit maydonni hosil qilishga va chulg'amning massasini kamaytirishga imkoniyat yaratadi.

O'ta o'tkazuvchan materiallar asosan o'zgarmas tok manbasiga ulanadigan mashinalarning qo'zg'atish chulg'amlari o'rnida ishlatildi

---

* *Шереметьевский Н.Н., Калашников В.К., Плещунов Н.Н. и др. Сверхпроводниковые электрические машины. – Л., ВНИИ электромаш, 1983.*

(25.2-rasm). Ularning o'zgaruvchan tok oqadigan chulg'amlar o'rnida ishlatish texnik jihatdan mumkin, lekin elektr isroflar va juda kichik kritik toklar bo'lgani uchun qulay hisoblanmaydi. Shuning uchun hozirgi vaqtda sinxron va o'zgarmas tok mashinalari qo'zg'atish chulg'amlari uchun ishlatiladigan o'ta o'tkazuvchan materiallarni yaratish ustida ishlar olib borilmoqda.

Qo'zg'atish chulg'ami o'ta o'tkazuvchan materialdan tayyorlangan bo'lsa, kritik temperaturada bu materialni tutib turish uchun maxsus sovitish qurilmasi ichiga solish kerak. Bunday sovitish qurilmasiga *kriostat* deyiladi. Kriostat Dyuar idishi bo'lib, uning ichida qo'zg'atish chulg'ami joylashtirilib suyuq geliy bilan sovitilib turadi. Issiqlikni kamaytirish maqsadida bu idish azot bilan to'ldirilgan boshqa idish ichiga joylashtiriladi. Sinxron mashinalarda kriostat rotorda joylashtiriladi, o'zgarmas tok mashinalarda esa kriostat statorda joylashtiriladi.

O'ta o'tkazuvchan materialdan bo'lgan chulg'amda kuchli magnit maydoni hosil bo'lgani uchun, odatdagi magnit o'tkazgichni ishlatsa magnit isroflar ancha ko'payib ketadi, va shu sababli, yakor chulg'ami joylashtirilgan muhit pazsiz yoki nomagnit materialdan yasaladi, natijada mashinaning og'irligi kamayadi va o'lchamlari kichiklashadi.

Ferromagnit po'lat o'zakning bo'lmasligi esa mashinaning xarakteristikalariga yakor reaksiyasining ta'siri sezilarsiz bo'ladi. Oddiy mashinalarga qaraganda o'ta o'tkazuvchan chulg'amli mashinalarda havo oralig'ida magnit induksiyasining qiymatini 3÷4 marta, chizig'iy yuklamani esa 1÷2 marta oshirish mumkin bo'ladi, natijada mashinaning aktiv hajmi 4,5÷8 martagacha kichiklashadi.

Elektr mashinalarida o'ta o'tkazuvchan materiallardan tashqari krioo'tkazuvchan materiallarni ham qo'llash ustida izlanishlar olib borilmoqda. Bunday material juda kuchli sovitilganda o'zining qarshiligini kamaytiradi, lekin o'ta o'tkazuvchanlik xossaga ega bo'lmaydi. Krioo'tkazuvchan materialga tozalangan aluminiy misol bo'ladi. Alyuminiy 20 K temperaturada o'zining qarshiligini 10^4 marta kamaytiradi. Krioo'tkazuvchan materiallarni transformatorlar chulg'amlarini tayyorlash uchun ham ishlatish mumkin.

25.4. Katta quvvatli istiqbolli sinxron mashinalar

Turbogeneratorlar. Hozirgi vaqtda elektr mashinasozligidagi muammolardan biri katta quvvatli elektr mashinalarini yaratishdir. Bu muammoni amalga oshirish uchun elektr mashinasozligida sifatli

elektrotexnik va konstruksion materiallarni va effektiv sovitish sistemalarini qo'llash lozim bo'ladi.

Bu sohada turli xorijiy va MDH mamlakatlarida katta tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Hozirgi vaqtda Rossiyada quvvati 500 va 800 MW, aylanish chastotasi 3000 ayl/min bo'lgan turbogeneratorlarni ishlab chiqarish yo'lga qo'yilgan. 1976-yildan buyon Rossiyada quvvati 1200 MW bo'lgan ikki qutbli turbogenerator Kostroma IES da ishlatib kelinmoqda. Bu turbogeneratorning stator chulg'ami bevosita suv bilan, rotor chulg'ami esa vodorod bilan sovitiladi. Xuddi shuningdek GFR va Shveysariya davlatlarida quvvati 1200 MV·A bo'lgan ikki qutbli turbogenerator, AQSH da esa quvvati 1200 MV·A bo'lgan ikki qutbli turbogenerator va quvvati 1120 MV·A bo'lgan ikki qutbli turbogeneratori yaratilgan. AES da qo'llaniladigan quvvati 500 MW bo'lgan to'rt qutbli turbogeneratori Rossiyada yaratilgan bo'lib, uning chulg'amlari suv bilan sovitiladi. Xuddi shuningdek Rossiyada quvvati 1000 MW bo'lgan to'rt qutbli turbogeneratori ham yaratillib, uning stator chulg'ami suv bilan rotor chulg'ami esa vodorod bilan sovitiladi. Fransiyada esa eng katta quvvatli 1480 MW, GFR da esa quvvatlari 1360 va 1200 MW bo'lgan to'rt qutbli turbogeneratorlari yaratilgan. Xuddi shunday quvvatli to'rt qutbli turbogeneratorlar AQSH da ham tayyorlangan. Hozirgi vaqtda Rossiyada chulg'amlari suv bilan sovitiladigan quvvati 800 MW aylanish chastotasi esa 3000 ayl/min bo'lgan ikkita ikki qutbli turbogenerator ishlatilmoqda.

Gidrogeneratorlar. Keyingi vaqtlarda Rossiyada Krasnoyarsk GES uchun quvvati 590 MV·A, aylanish chastotasi 90 ayl/min va Sayano-Shushensk GES uchun esa quvvati 711 MV·A, aylanish chastotasi 142 ayl/min bo'lgan gidro-generatorlar yaratilgan bo'lib, stator chulg'ami suv bilan rotor chulg'ami esa havo bilan sovitiladi. Bundan tashqari Nurek GES (Tojikiston) uchun ishlab chiqarilgan, quvvati 353 MV·A, aylanish chastotasi 200 ayl/min bo'lgan gidrogenerator ishlatilmoqda. Generatorning stator va rotor chulg'amlari suv bilan, stator po'lat o'zagi esa havo bilan sovitiladi. Rogun GES (Tojikiston) uchun quvvati 667 MV·A, aylanish chastotasi 167 ayl/min bo'lgan va stator hamda rotor chulg'amlari suv bilan sovitiladigan gidrogeneratorlar yaratilgan.

Shvetsiyada quvvati 190 MV·A, aylanish chastotasi 375 ayl/min bo'lgan gidrogeneratori yaratilgan. Agarda bu generator faqat suv bilan sovitilsa uning quvvatini 1000 MW ga oshirish mumkin bo'lar ekan. Eng katta quvvatli gidrogeneratorlarning ayrim parametrlari 25.1-jadvalda keltirilgan.

25.1-jadval

Generatorlarning turi	*Alstom, Fransiya*	*Vestin-gauz, AQSH*	*Toshiba Xitachi*	*Elek-trosila, Rossiya*	*UETM, Rossiya; Simens FRG*
Quvvati, MV·A/MW	500 / 475	615/600	700/630	711/640	353/300
Aylanish chastotasi, ayl/min	200	72	112,5	142,8	200
Kuchlanishi, V	15	15	18	15,75	15,75
Stator chulg'amini sovitish sistemasi	havo	havo	havo	suv	suv
Rotor chulg'amini sovitish sistemasi	havo	havo	havo	havo	suv
Quvvat koeffitsienti	0,95	0,95	0,9	0,9	0,85
FIK, %	–	98,37	98	98,3	98,3

25.1-jadvalga izoh: " – " ishora ma'lumot noma'lum ekanligini bildiradi.

Sinxron kompensatorlari. Hozirgi vaqtda Rossiyada vodorod bilan sovitiladigan quvvati 160 MV·A bo'lgan sinxron kompensatorlarini ishlab chiqarish yo'lga qo'yilgan. Suv bilan sovitiladigan 350 MV·A quvvatli sinxron kompensatorlarni ishlab chiqarish bo'yicha tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Shvetsiyadagi firmalardan birida suv bilan sovitiladigan quvvati 345 MV·A, aylanish chastotasi 900 ayl/min bo'lgan sinxron kompensator yaratilgan.

Nazorat savollari:

1. Bo'ylama va ko'ndalang o'qlari bo'yicha qo'zg'atiladigan sinxron mashinalarning tuzilishi va ishlash prinsipini tushuntirib bering.

2. Asinxronlashtirilgan sinxron mashinaning tuzilishi va ishlash prinsipi qanday?

3. O'ta o'tkazuvchan chulg'amli sinxron mashinaning tuzilishi va o'ziga xos xususiyatlari qanday?

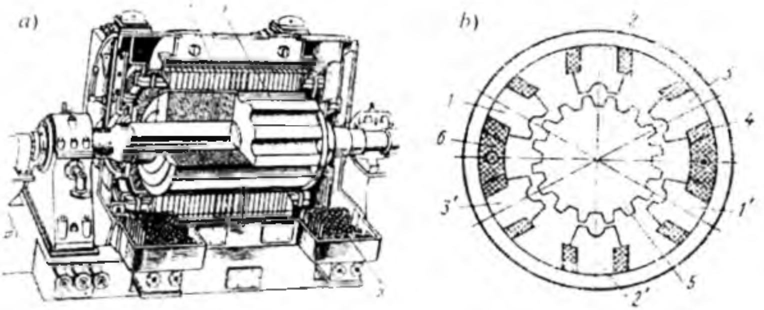
4. Katta quvvatli istiqbolli sinxron mashinalar haqida ma'lumot bering.

26-BOB. MAXSUS MAQSADLI SINXRON MASHINALAR. SINXRON MASHINALARNI ISHLATISHGA OID AMALIY MASLAHATLAR

26.1. Induktorli generatorlar

Induktorli generatorlar sinxron generatorning ko'rinishlaridan biri hisoblanib, juda katta chastotali EYK ga ega bo'ladi. Yuqori chastota (1000÷ 10000 Hz) xo'jalik turlarining ko'pgina sohalarida, shuningdek, induksion qizdirishda, metallarni elektr yoyi bilan eritishda, elektr payvandlashda, detallarni yuqori chastotali elektr energiya bilan qizdirib ishlov berishda, yuqori tezlikli elektr yuritmalarida va boshqalarda ishlatiladi.

An'anaviy sinxron generatorning yakor chulg'amida hosil bo'ladigan EYK ning chastotasi $f = pn / 60$ bilan aniqlanadi. Chastota f ni, aylanish chastota *n* ni oshirish hisobiga ko'paytirish mumkin, lekin uni rotorning mexanik mustahkamligi cheklab qo'yadi. Juft qutblar sonini ko'paytirib, chastotani oshirishda esa qutb bo'linmasining o'lchamlari o'zgaradi. Shuning uchun an'anaviy konstruksiyali sinxron generatorlar $f \leq 400$ Hz bo'lgan chastotalarda ishlab chiqariladi. Yuqori ($f > 400$ Hz) chastotalarni olish uchun esa *induktorli generatorlar* ishlatiladi.



26.1-rasm. *Katta quvvatli TBB seriyali turbogeneratorning qo'zg'atgichi sifatida ishlatiladigan quvvati 2700 kVA bo'lgan uch fazali kontaksiz yuqori chastotali induktorli generator* ***(a)*** *(bunda:* ***1*** *— stator;* ***2*** *— rotor;* ***3*** *— gaz sovitgich) va uning elektromagnit sxemasi*(***b***) *(bunda:* ***1 - 1'***, ***2 - 2'***, ***3 - 3'*** *— qutblar;* ***4*** *— yakor chulg'ami;* ***5*** *— rotor;* ***6*** *— qo'zg'atish chulg'ami).*

Induktorli generatorlar katta quvvatli sinxron generatorlar uchun qo'zg'atgich bo'lib ham xizmat qiladi. Masalan, quvvati 2700 kV·A bo'lgan uch fazali kontaksiz induktorli generator (26.1,*a*-rasm) katta quvvatli TBB seriyali turbogeneratorlarning qo'zg'atgichi sifatida qo'llaniladi. Bu generator ishlab chiqargan katta chastotali EYK to'g'rilagich orqali o'zgarmasga aylantirilib turbogeneratorning qo'zg'atish chulg'amiga beriladi.

Induktorli generatorning statori alohida po'lat plastinalardan yig'iladi. Stator po'lat o'zagi pazlarida chulg'amlar joylashtiriladi. Pazlar ochiq yoki yarim yopiq shaklda bo'ladi. Rotor po'lat o'zagi alohida-alohida plastinalardan yig'ilib, undagi pazlarga hech qanday chulg'am o'rnatilmaydi, shuning uchun ham induktorli generatorlar kontaktsiz hisoblanadi.

Statorda yakor chulg'ami va qo'zg'atish chulg'ami joylashtiriladi. Yakor chulg'ami stator po'lat o'zagi tishlariga o'raladi. Qo'zg'atish chulg'ami esa har xil joylashishi mumkin. Qo'zg'atish chulg'amining joylashishiga qarab induktorli generatorlar bir xil qutbli va har xil qutbli turlarga bo'linadi.

Har xil qutbli generatorlarda qo'zg'atish chulg'amining g'altagi statordagi katta pazlarda joylashtiriladi (26.1,*b*-rasm) va har xil qutblar ketma-ket keladi. Shuning uchun ham bunday generatorlarga ***har xil qutbli generatorlar*** deyiladi. Bularda qo'zg'atish chulg'amining magnit oqimi stator va rotor paketlarining bir xil ishorali qutbidan boshqa ishorali qutbiga o'tadi.

Induktorli generatorlarda stator va rotor tishlari ma'lum bir nisbatda bo'ladi:

$$Z = 2 \cdot Z_2 \cdot m \cdot q \ , \qquad (26.1)$$

bu yerda: m — fazalar soni; q — bir qutb va bir fazaga to'g'ri keluvchi pazlar soni.

Stator va rotorda tishlar bo'lganligi sababli, magnit oqimi qutb bo'linmasida bir xilda tarqalmaydi. Uning ko'proq qismi rotor tishi stator tishi ostiga to'g'ri kelgan qismida joylashsa, oqimning kam qismi esa rotor pazi stator tishi ostiga to'g'ri kelgan joyda bo'ladi.

Magnit induksiya o'zgarmas va o'zgaruvchan tashkil etuvchilardan iborat bo'ladi. Uning o'zgaruvchan tashkil etuvchisi $V_{o'z}$ yakor chulg'amlarida EYK ni hosil qiladi. Bu EYK ning davri rotorning tish bo'linmasi bo'yicha burilishga bog'liq bo'lib, chastotasi quyidagicha topiladi:

$$f_1 = z_2 \ n / \ 60. \qquad (26.2)$$

Uch fazali induktorli generatorda yakor chulg'amining har qaysi fazasiga stator qutblarining bitta jufti to'g'ri keladi. Qo'zg'atish chulg'ami ikki qutbli magnit maydonni hosil qiladi, ya'ni bu chulg'am paydo qilgan har qaysi qutb statorning uchta qutbidan tashkil topgan (uch qismga bo'lingan). Stator qo'shni qutblarining tishlari rotor tishlariga nisbatan 1/6 tish bo'linmasiga siljigan, shuning uchun rotor 1/6 tish bo'linmasiga burilganda magnit oqimning maksimumi bitta qutbdan boshqasiga ko'chadi. Rotor aylanganda yakor chulg'amining har bitta fazasida bir fazali mashinadagi kabi chastotasi $f_1 = z_2 n /60$ (bunda z_2 – rotor tishlarining soni) bo'lgan EYK:

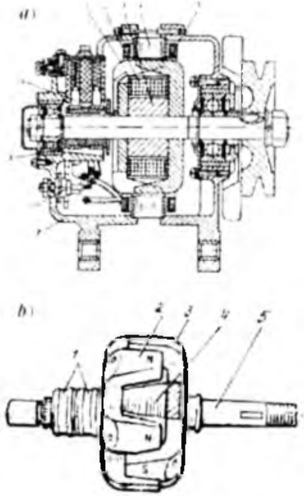
$$E = 4{,}44\, f_1\, w_a\, k_{ch.a} \Phi_{(\sim)max}, \qquad (26.1)$$

hosil bo'ladi, lekin qo'shni fazalarning EYK vaqt bo'yicha 120° ga siljigan bo'ladi. (26.1) da $\Phi_{(\sim)max} = 0.5\,(\Phi_{(\sim)max} - \Phi_{(\sim)min})$ – bitta qutb magnit oqimining o'zgaruvchan tashkil etuvchisi.

26.2. Avtomobil va traktorlarda hamda temiryo'l vagonlarida keng qo'llaniladigan changalsimon qutbli sinxron generatorlar

Avtotraktor generatorlari. Oldin ta'kidlanganidek, elektr mashinalarida energiyaning o'zgarishi, magnit zanjirining magnit maydon energiyasi yig'ilgan joyi – mashina havo oralig'ida yuzaga keladi. Bunda magnit maydonining shakli asosan mashinaning energetik ko'rsatkichlarini belgilaydi. Yig'ilgan g'altakli chulg'amda mashina havo oralig'ida taxminan sinusoidal taqsimlangan magnit maydonni havo oralig'iga maxsus shakl berish hisobiga uning magnit o'tkazuvchanligini o'zgartirish orqali erishish mumkin. Buning uchun rotorda joylashgan qutb uchligiga *changalsimon* shakl beriladi (26.2,*a*-rasm). Bunday shakldagi qutb uchliklar mashinaning o'qi bo'yicha joylashgan bitta qo'zg'atish g'altagida havo oraliqda aksial (ya'ni shu o'q bo'yicha) yo'nalgan alohida qutblar oqimlarini radial yo'nalishga o'zgartirib, rotorning uncha katta bo'lmagan diametrida sinxron generatorning ko'p qutbli konstruksiyasini olishga imkon beradi.

Qutblarining kostruksiyasi changalsimon shaklga ega bo'lgan rotorli sinxron generatorlar *avtomobil va traktorlarda keng qo'llaniladi*. Bu generator – ventil generatoridir (uning korpusida kremniy diodi asosida to'g'rilagich bloki joylashgan). Generator avtomobilda akkumulator batareyasi bilan parallel ishlab uni zaryadkalab turadi, shuning uchun uning chiqishidagi kuchlanish o'zgarmas qiymatga ega bo'lishi lozim.

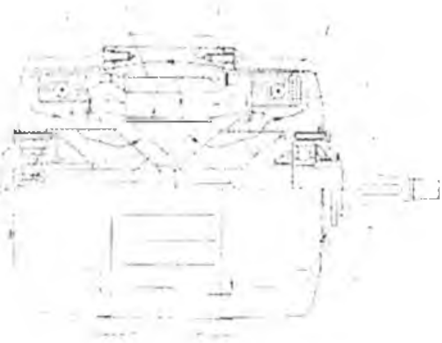


26.2-rasm. *G-250 tipli avtomobil generatori(**a**) (bunda: **1** — changalsimon qutb uchligi; **2** — qo'zg'atish chulg'ami; **3** — vtulka; **4** — stator; **5** — stator chulg'ami; **6** — korpus (podshipnik qalqoni); **7** — to'g'rilagich; **8** — kontakt halqa; **9** — cho'tka) va uning changalsimon qutb uchlikli rotori (**b**) (bunda: **1** — kontakt halqalar; **2** va **3** — qo'shni changalsimon qutb uchliklari; **4** — qo'zg'atish chulg'ami; **5** — rotorning vali)*

26.2,*a*-rasmda changalsimon rotorli G-250 tipli *avtomobil generatori* ko'rsatilgan. Bunda ikkita changalsimon qutb uchligi (*1*) o'n ikki qutbli magnit sistemani vujudga keltiradi. Qo'zg'atish chulg'ami (*2*) vtulka (*3*)da joylashtiriladi. 18 ta pazli stator (*4*) yupqa elektrotexnik po'lat listlaridan yig'ilgan. Stator chulg'ami (*5*) uch fazali bir qatlamli, bitta qutbga va har qaysi fazaga to'g'ri keladigan pazlar soni q = 0,5. Korpus (*6*) (podshipnik qalqonlari) aluminiy qotishmasidan tayyorlangan. Uch fazali o'zgaruvchan kuchlanish to'g'rilagich (*7*) vositasida o'zgarmasga aylantiriladi. O'zgarmas tok rotorda joylashgan qo'zg'atish chulg'amiga ikkita halqa (*8*) va ikkita cho'tka yordamida beriladi.

Changalsimon qutbli kontaktsiz sinxron generator. Agar yuqorida keltirilgan changalsimon qutbli mashinaning konstruksiyasini kontaksiz qilib, ya'ni qo'zg'atish chulg'ami halqasimon ko'rinishda statorda joylashtirilsa muhim ahamiyatli sifatga ega bo'ladi (26.3-rasm). Generatorning qo'zg'atish chulg'ami ikkita qo'zg'almas halqasimon g'altak (*1*) podshipnik qalqonlari (*5*, *11*) tokchasida joylashtirilgan. G'altaklarning toklari vujudga keltirgan magnit maydon kuch chiziqlari asosan quyidagi yo'ldan, ya'ni: shimoliy qutblar (*9*) dan havo oralig'i orqali o'tib yakor o'zagi (*3*)ning tishlariga; yakor yarmosi va tishlari bo'yicha yana bir marta havo oralig'i orqali o'tib janubiy qutblar (*8*) magnit ga; janubiy qutblar yarmosi (*7*) bo'yicha; yarmo (7) va qalqon (*5*) orasidagi havo oraliq orqali o'tib; qalqon (*5*), stanina (*4*) va chap

tomonidagi qalqon (*11*) lar bo'yicha; qalqon (*11*) va shimoliy qutblar yarmosi (*10*) orasidagi havo oralig'idan hamda yarmo (*10*) bo'yicha yana shimoliy qutblarga o'tib berk zanjir hosil qiladi. Qo'zg'atish maydoni qisman tarqalib yakor chulg'ami bilan ilashadi. Val (*6*) qutblarning yarmolari (*7, 10*) va qutblari (*8, 9*) bilan aylanganda yakor chulg'ami bilan oqim ilashish davriy ravishda o'zgarib unda EYK hosil bo'ladi.



26.3-rasm. *Rotori changalsimon qutblardan iborat bo'lgan kontaksiz sinxron generator, bunda:* ***1*** *– halqasimon qo'zg'atish g'altaklari;* ***2*** *– yakor chulg'ami;* ***3*** *– yakorning magnit o'tkazgichi;* ***4*** *– stanina (tana gardishi);* ***5, 11*** *– podshipnik qalqonlari;* ***6*** *– val;* ***7, 10*** *– janubiy va shimoliy qutblarning yarmosi;* ***8, 9*** *– janubiy va shimoliy qutblar.*

24-rasmda ko'rsatilgan changalsimon qutbli kontaksiz sinxron generator konstruksiyasi 23-rasmdagi bilan shu bilan farq qiladiki, uning rotorida kontakt halqa yo'q, chunki qo'zg'atish chulg'ami statorda joylashtirilgan.

Mashinadan og'ir sharoitlarda uzoq muddatda ishlatishda yuqori ishonchlilik talab qilinganda *kontaksiz sinxron generatorlar qo'llaniladi*. Quvvati 10 kW va undan katta quvvatli bunday generatorlar, masalan, *temiryo'l vagonlari* elektr ta'minoti sistemasi uchun qo'llaniladi.

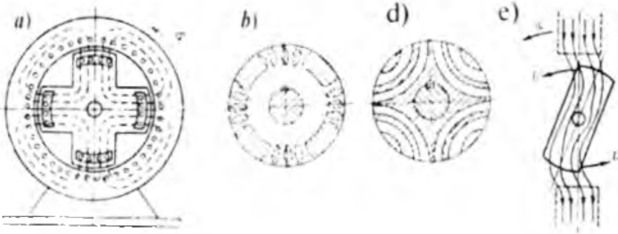
26.3. Avtomatika qurilmalarida ishlatiladigan sinxron motorlarning ayrim turlari

1. *Reaktiv sinxron motorlar.* Reaktiv sinxron motorlar rotorining bo'ylama va ko'ndalang o'qlari bo'yicha magnit o'tkazuvchanligi har xil bo'ladigan konstruksiyaga ega bo'lishi kerak. Bunday motorning qutblarida qo'zg'atish chulg'ami bo'lmaydi. Mashina normal ishlaganda asosiy magnit oqim faqat stator chulg'amining aylanma MYK tomonidan hosil qilinadi. Magnit oqim bunday mashinalarda qarshiligi kam bo'lgan yo'l bilan tutashadi va qutblarning bo'ylama o'qi bo'yicha

o'tib aylantiruvchi momentni hosil qiladi (26.4,*a*-rasm). *Bu moment* reaktiv sinxron motorda bo'ylama va ko'ndalang o'qlari bo'yicha magnit o'tkazuvchanlik har xil bo'lgani sababli vujudga kelganligidan, uni *reaktiv moment* deyiladi.

Ma'lumki, katta quvvatli sinxron motorlarning reaktiv momentini hisoblashda yakor chulg'amining aktiv qarshiligini $r_a \approx 0$ deb, quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$M_r = [m \cdot U^2/(2 \cdot \omega)] \cdot (1/x_q - 1/x_d) \cdot \sin 2\theta. \qquad (26.2)$$



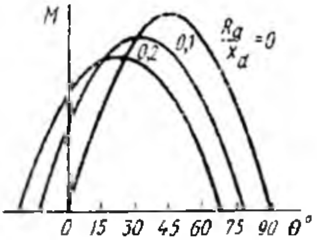
26.4-rasm. *To'rt qutbli ishga tushirish (dempfer) chulg'amli ayon qutbli sinxron reaktiv motorning odatdagi magnit o'tkazgich konstruksiyasi (**a**) va uning noayon ko'rinishdagi modifikatsiyasi (**b**); takomillashtirilgan, ya'ni mashinaning ko'ndalang o'qi bo'yicha induktiv qarshiligi x_q ni kamaytirish maqsadida nomagnit oraliqlarga quyma aluminiy sterjenlardan hosil qilingan dempfer chulg'amli segmentlangan magnit o'tkazgich (**d**) va ikki qutbli sinxronmotor uchun reaktiv momentning vujudga kelish sxemasi (**e**); F_t — tangensial kuch.*

Lekin, avtomatika qurilmalarida ishlatiladigan sinxron reaktiv motorlar kam quvvatli, demak, ularning yakor chulg'ami aktiv qarshiligi r_a katta quvvatli mashinalarnikiga nisbatan katta qiymatga ega bo'lganligidan, u reaktiv momentga ta'sir qiladi, shuning uchun uni hisobga olish zarur bo'ladi (26.5-rasm). Bu holda reaktiv moment quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$M = P_{em}/\omega_1 = [mU^2/(2\omega_1) \cdot (x_d - x_q) /$$

$$(x_d x_q + r_a^2)] \cdot [(x_d x_q - r_a^2) \cdot \sin 2\theta - 2r_a(x_d + x_q) \cdot \sin^2\theta + 2r_a x_q]. \qquad (26.3)$$

Ta'kidlash lozimki, sinxron mashina rotorining konstruksiyasi noayon ko'rinishda bo'lganda ham uning bo'ylama va ko'ndalang o'qlari bo'yicha magnit o'tkazuvchanligini har xil qilish mumkin.



26.5-rasm. *Kam quvvatli reaktiv sinxron motorning aktiv va induktiv qarshiliklari nisbati r_a/x_d ning har xil qiymatdagi burchak xarakteristikalari.*

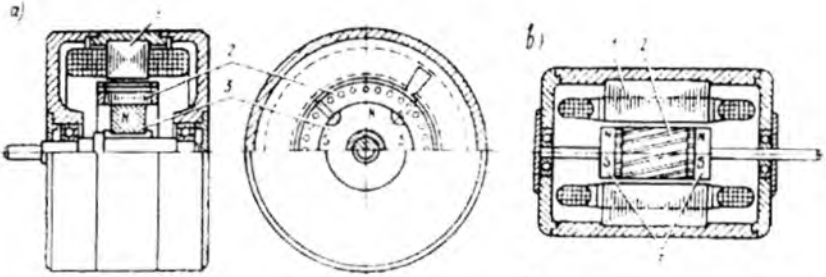
Shu maqsadda rotor po'lat o'zagining ko'ndalang o'qiga aluminiy quyiladi (26.4,*b*-rasm). 26.4,*d*-rasmda esa bunday modifikatsiyaning takomillashgan, ya'ni ko'ndalang o'qqa segment ko'rinishdagi aluminiy sterjenlar quyilgandagi konstruksiya, induktiv qarshiliklar nisbati x_d/x_q ni taxminan 4÷5 gacha yetkazishga va, natijada nisbatan kattaroq reaktiv moment olishga imkon beradi.

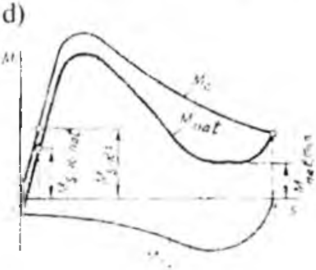
Reaktiv sinxron motorning stator chulg'ami uch fazali elektr tarmog'iga ulanganda hosil bo'lgan aylanma magnit maydon rotorni o'z orqasidan ergashtiradi (26.4,*e*-rasm) va rotor magnit maydonning aylanish yo'nalishida sinxron chastotada aylanadi.

Burchak $\theta = 45°$ bo'lganda moment o'zining maksimum qiymatiga erishadi. Reaktiv motorning energetik ko'rsatkichlari (η, $\cos\varphi$) kichikligi uning kamchiligidir. FIK ning kichik bo'lishiga sabab, yakor chulg'amidagi elektr isroflarining katta bo'lishidandir. Quvvat koeffitsientining kichik bo'lishi esa, magnit maydon hosil qiluvchi magnitlovchi tokning katta bo'lishidir. Reaktiv motorlar 50 W dan 100 W gacha mo'ljallab ishlab chiqariladi. Ular avtomatik qurilmalarda va boshqa ayrim sohalarda ishlatiladi. Konstruksiyasi oddiy, o'zgarmas tok manbasiga ehtiyojning bo'lmasligi va tannarxining kamligi reaktiv sinxron motorning *afzalligi* hisoblanadi.

Doimiy magnitli sinxron motorlar. Bunday sinxron motorlarning o'ziga xos xususiyati shundan iboratki, ularda qo'zg'atish magnit maydonini hosil qilish uchun rotorda doimiy magnitlar joylashtiriladi. Ular motorni sinxronizmga kiritish vazifasini, qisqa tutashgan chulg'am esa sinxron motorni asinxron usulda ishga tushirish vazifasini bajaradi.

Konstruksiyasining soddaligi, kontakt halqalarining bo'lmasligi (ya'ni kontaksizligi), FIK ning nisbatan katta bo'lishi, qo'zg'atish chulg'ami bo'lmaganidan elektr isroflarining kamligi hamda mashinada magnit maydon hosil qilish uchun o'zgarmas tok manbasiga zaruratning yo'qligi bunday motorlarning *afzalligi* hisoblanib, magnit maydonini





26.6-rasm. *Doimiy magnit rotorda radial joylashgan(**a**) va aksial, ya'ni mashina o'qi bo'yicha joylashgan(**b**) sinxron motorlar (bularda: **1** – stator; **2** – qisqa tutashgan, ya'ni ishga tushirish chulg'ami; **3** – doimiy magnitlar) hamda sinxron motorni ishga tushirishda elektromagnit momentlarning o'zgarishlari grafigi (**d**) (bunda: M_a – asinxron moment; M_t – tormozlovchi moment; M_{nat} – natijaviy moment; $M_{s.k.nat}$ – natijaviy momentning motorni sinxronizmga kiritish qiymati; $M_{s.k.a}$ – asinxron momentning sinxron motorni sinxronizmga kiritish qiymati.*

boshqarishning qiyinligi, narxining nisbatan qimmatligi ularning *kamchiligidir*.

26.6,*a*-rasmda doimiy magnitlarning rotorda radial joylashishi, 26.6,*b*-rasmda esa aksial joylashishi ko'rsatilgan. Bu motor sinxron usulda ishga tushirilganda asinxron momentdan tashqari yana tormozlovchi moment ham hosil bo'ladi (26.6,*d*-rasm). Tormozlovchi moment rotor qutblarida hosil bo'lgan magnit maydoni bilan shu maydon hosil qilgan statordagi tokning ta'sirlashishi natijasida vujudga keladi.

Doimiy magnitli sinxron motorlarning energetik ko'rsatkichlari yaxshi, yuklanish qobiliyati yuqori va aylanish chastotasi barqaror bo'ladi. Bunday sinxron mikromotorlar avtomatikada keng ishlatiladi.

Nazorat savollari:

1. Induktorli generator haqida ma'lumot bering.

2. Reaktiv sinxron motorning ishlash prinsipi to'g'risida ma'lumot bering.

3. Doimiy magnitli sinxron motorning tuzilishi va ishlash prinsipini gapiring.

V BO'LIM.
O'ZGARMAS TOK MASHINALARI

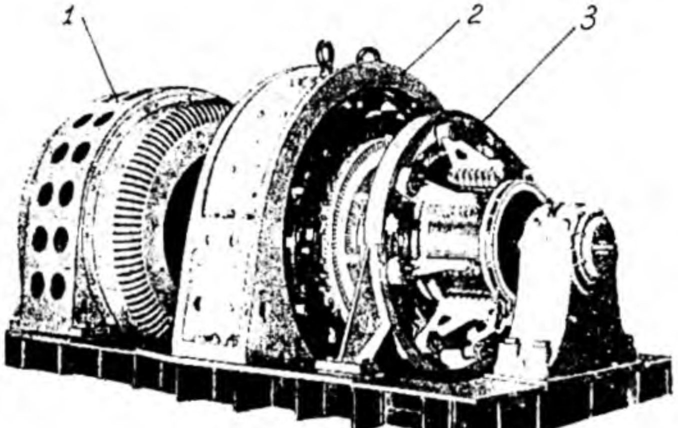
O'zgartirgich texnikasining jadal o'sishi tufayli o'zgarmas tok (O'T) mashinalari ko'pchilik holda motor rejimida ishlatilib amaliyot uchun muhim bo'lgan quyidagi afzalliklarga ega:

a) aylanish chastotasining oddiy usulda keng ko'lamda silliq o'zgartirilishi;

b) nisbatan kam tokda katta ishga tushirish momentining hosil bo'lishi;

d) o'ta yuklama bilan ishlash qobiliyatining nisbatan kattaligi;

e) har xil bikirlikka xos (aylanish chastotasi kam yoki ko'p o'zgaradigan) mexanik xarakteristikalarni olish mumkinligidir.



V.1-rasm. *Quvvati 1000 kW, U = 250 V, I_x = 4000 A, n=750 ayl/min bo'lgan tayanch podshipnikli o'zgarmas tok generatori (ishlatishga o'rnatilgan holati): 1 — birlamchi motor; 2 — generator; 3 — cho'tkali qurilma.*

27-BOB. O'ZGARMAS TOK MASHINALARINING KONSTRUKSIYASI VA ISHLASH PRINSIPI

27.1. O'zgarmas tok mashinalarining tuzilishi va ishlash prinsipi

O'zgarmas tok motor (O'TM)lari elektr transportida, avtomatik rostlash sistemasida, jo'valash stanoklarida, yuk ko'tarish kranlarida, ekskavatorlarda, metallarga ishlov berish stanoklarida, to'qimachilik sanoatida keng ishlatiladi. O'T generatorlari (V.1-rasm) esa O'T energiya manbayi sifatida (masalan, katta quvvatli O'TM larini o'zgarmas tok bilan ta'minlashda) ishlatiladi.

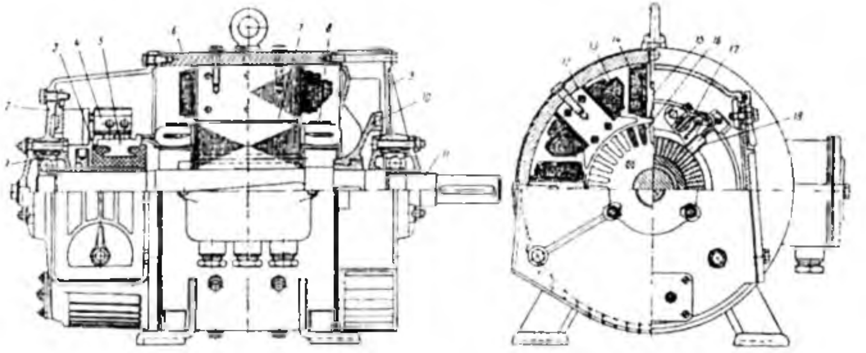
O'T mashinalari cho'tka-kollektor apparatlarining ishi bilan bog'liq bo'lgan *kamchiliklari* mavjud, ya'ni katta yuklamada cho'tkalar bilan kollektor orasida yuzaga keladigan uchqunlanish mashina ishiga salbiy ta'sir ko'rsatib *ishonchlilik darajasini pasaytiradi*. Shu sababli O'T mashinalarini portlashga xavfli bo'lgan muhitlarda ishlatib bo'lmaydi. Kollektor O'T mashinasining konstruksiyasini murakkablashtiradi, ekspluatatsiya jarayonida uni muntazam nazorat qilib turish talab qilinadi. O'TM qisqa tutashgan rotorli asinxron motorga nisbatan 2,5÷3 marta qimmat va uni ishlatish uchun O'T energiya manbasi yoki o'zgaruvchan tokni to'g'rilagich qurilmasi zarur bo'ladi.

Lekin, so'nggi yillarda O'TMlarini reostatsiz ishga tushirishga imkon beradigan O'T ni rostlashning tejamli metodi ishlab chiqilganligi; O'T yuritmasi chastota vositasida rostlanadigan yuritmaga nisbatan arzonligi; kollektorsiz O'T mashinalari ham ixtiro qilinib amalda qo'llanila boshlanganligi kollektor bilan bog'liq bo'lgan jiddiy kamchilikka nisbatan barham berilib ishonchlilik daraja yaxshilanmoqda.

O'zgarmas tok mashinasining tuzilishi. O'T mashinasining qo'zg'almas qismini – *stator*, aylanuvchi qismini esa – *yakor* deyiladi. Stator – sifatli po'latdan tayyorlanadigan stanina (tana gardishi) va uning ichki tomoniga mahkamlangan bosh hamda qo'shimcha qutblardan iborat. Stanina va qutblar o'zagi magnit sistemaning tarkibiy qismiga kiradi.

Asosiy qutb o'zagi qalinligi 1 mm bo'lgan elektrotexnik po'lat listlardan yig'iladi. Mashina havo oralig'ida magnit maydonni zaruriy

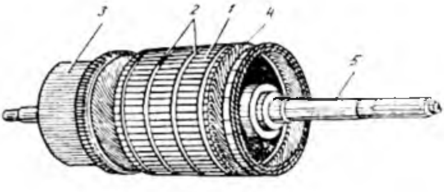
shaklda taqsimlash maqsadida asosiy qutblarning yakor tomonidagi uchiga maxsus("qutb uchligi") shakl beriladi (27.1-rasm).



27.1-rasm. *Quvvati 6 kW, aylanish chastotasi n = 1500 ayl/min, U_N = 220 V bo'lgan o'zgarmas tok mashinasi:* ***1*** *– sharikli podshipnik;* ***2*** *– oldingi (kollektor tomonidagi) podshipnik qalqoni;* ***3*** *– kollektorni plastmassa bilan mahkamlagich;* ***4*** *– cho'tka tutqich barmog'i;* ***5*** *– kollektor plastinasi;* ***6*** *– stanina (tana gardishi);* ***7*** *– yakor o'zagi;* ***8*** *– yakor chulg'ami pazdan tashqari qismining bandaji (kamari);* ***9*** *– orqa tomondagi podshipnik qalqoni;* ***10*** *– ventilator;* ***11*** *– val;* ***12*** *– bosh qutb;* ***13*** *– bosh qutb qo'zg'atish g'altagi;* ***14*** *– qo'shimcha qutb qo'zg'atish g'altagi;* ***15*** *– qo'shimcha qutb;* ***16*** *– yakor chulg'ami joylashtirilgan paz;* ***17*** *– cho'tka tutqich;* ***18*** *– cho'tka.*

Qo'zg'atish chulg'amining g'altaklari qutb o'zaklariga kiydiriladi va staninaga siqib mahkamlanadi. O'rta va katta quvvatli O'T mashinalarida sovitish yuzani oshirish uchun qo'zg'atish g'altaklarini ikki qismga bo'ladilar. Asosiy qutb g'altaklarini shimoliy va janubiy qutblar navbatma-navbat keladigan tartibda ulab *qo'zg'atish chulg'ami hosil qilinadi.* Bu chulg'am mashinada asosiy maydon hosil qilish uchun xizmat qiladi.

Quvvati 1 kW va undan katta bo'lgan O'T mashinalarida kommutatsiya jarayonida sodir bo'ladigan uchqunlanishni kamaytirish uchun qo'shni joylashgan bosh qutblar orasida (mashinaning ko'ndalang o'qi bo'yicha) qo'shimcha qutblar o'rnatiladi. *Qo'shimcha qutblar* o'zagi yaxlit po'lat yoki qalinligi 1 mm po'lat listlaridan yig'ilgan bo'ladi. O'zakka to'g'riburchak kesimli simdan tayyorlangan chulg'am g'altagi o'rnatiladi.



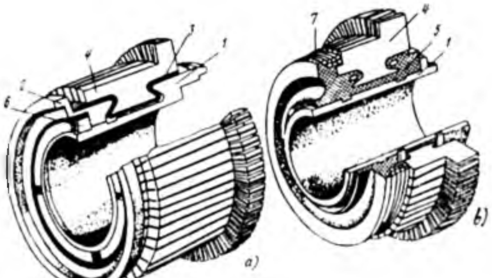
27.2-rasm. *O'zgarmas tok mashinasining yakori:* ***1*** *– yakor o'zagi;* ***2*** *– bandajlar;* ***3*** *– kollektor;* ***4*** *– yakor chulg'amining pazlardan tashqari qismi;* ***5*** *– val.*

Yakor (27.2-rasm) – val va unga o'rnatilgan silindrik shakldagi po'lat o'zak, uning pazlariga joylashtirilgan yakor chulg'ami va uning seksiyalarini ulash uchun ma'lum tartibda yig'ilgan maxsus shakldagi mis plastinalari majmuasi (kollektor)dan iborat (27.3-rasm).

Yakorning po'lat o'zagi qalinligi 0,35 yoki 0,5 mm bo'lgan elektrotexnik po'lat listlardan yig'ilgan bo'ladi. Bu holda magnit maydonda yakor aylanishida o'zakda hosil bo'ladigan uyurma toklar ta'siri keskin kamayadi.

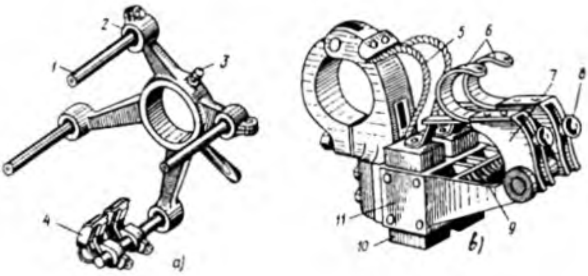
Yakor pazlaridagi chulg'am seksiyalarini maxsus ponalar bilan, pazdan tashqari qismlarini esa bandaj (kamar)lar bilan mahkamlanadi. *Kollektor (yig'uvchi)* sovuq holda jo'valangan qattiq misdan tayyorlangan ponasimon kesimli plastinalardan silindr shaklida yig'iladi. Plastinalar bir-biridan mikanit qistirmalar bilan izolatsiyalanadi. Kam va o'rta quvvatli O'T mashinalarida kollektor plastinalari va mikanit qistirmalar plastmassa yordamida presslab mahkamlanadi (27.3,*b*-rasm).

27.3-rasm. *O'zgarmas tok mashinasining metall (a) va plastmassa (b) korpusli kollektori:* ***1*** *– korpus;* ***2*** *– siquvchi flanets;* ***3*** *– izolatsion qistirma;* ***4*** *– kollektor plastinalari;* ***5*** *– plastmassa;* ***6*** *– siquvchi halqa;* ***7*** *– bandaj*



Yig'ilgan kollektor qizdirilgan holda valning yakor chulg'ami yoniga joylashtirib mahkamlanadi. Kollektor plastinalarining yakor chulg'ami tomonidagi chiqib turadigan qismiga chulg'am seksiyalari kavsharlanadi. Kollektor plastinalari yakor chulg'ami o'ramlarini

ketma-ket ulaydi. Kollektor yakor chulg'ami bilan birga aylanadi, uning yuzasida chulg'amni tashqi elektr zanjiri bilan bog'lovchi cho'tkalar traversaga (yoki podshipnik qalqoniga) mahkamlangan cho'tka tutqichlar yordamida qo'zg'almas holatda tutib turiladi. *Traversa* – zarurat tug'ilganda cho'tkalar sistemasini mashina qutblariga nisbatan siljitish imkonini beruvchi qurilmadir (27.4-rasm). Cho'tkalar va qo'zg'atish chulg'amidan chiqqan simlar maxsus klemma (qisqich)lar taxtachasiga chiqarilgan bo'ladi.



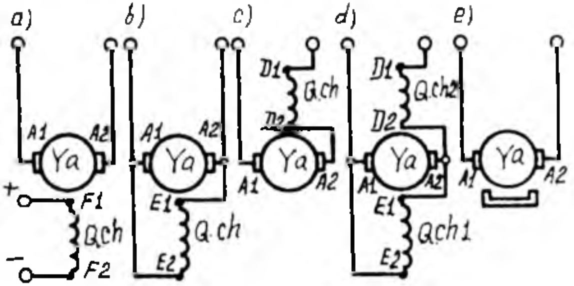
27.4-rasm. *O'zgarmas tok mashinasining cho'tka mexanizmi:* ***a*** *– traversa;* ***b*** *– cho'tka tutqich va cho'tkalar:* ***1*** *– cho'tka tutqichni mahkamlash uchun izolatsiyalangan barmoq;* ***2*** *– barmoqni siquvchi kronshteyn;* ***3*** *– cho'tkalarning kollektordagi holatini belgilash uchun bolt;* ***4*** *– cho'tka tutqich;* ***5*** *– sim;* ***6*** *va* ***7*** *– cho'tkani kollektorga siquvchi qismlar;* ***8*** *– cho'tka va kollektor orasidagi bosimni rostlash uchun gayka;* ***9*** *– prujina;* ***10*** *– cho'tka;* ***11*** *– cho'tkani o'rnatish uchun moslama.*

O'T mashinasini sovitish uchun uning valiga ventilator o'rnatiladi. Valning ikkala tomoniga podshipnik qalqonlari mahkamlanadi.

O'T mashinalari qo'zg'atilish usuliga ko'ra quyidagi turlarga bo'linadi (27.5-rasm): mustaqil, ketma-ket, parallel, aralash qo'zg'atishli va doimiy magnitli.

O'T mashinasining mustaqil qo'zg'atishli turida qo'zg'atish chulg'amiga tashqi O'T manbasidan tok berib asosiy maydon hosil qilinadi (27.5,*a*-rasm);

Parallel qo'zg'atishlida (27.5,*b*-rasm) mashinaning asosiy magnit maydoni qutb o'zagidagi qoldiq magnit oqimi ta'sirida, ya'ni o'z-o'zini qo'zg'atish hodisasi tufayli hosil bo'ladi; ketma-ket qo'zg'atishli turida (27.5,*d*-rasm) mashinaning asosiy maydoni yuklama



27.5-rasm. *Har xil qo'zg'atishli o'zgarmas tok mashinalarining elektr sxemalari:* ***a)*** *mustaqil;* ***b)*** *parallel;* ***d)*** *ketma-ket;* ***e)*** *aralash;* ***f)*** *doimiy magnitli.*

ulangandan keyingina hosil bo'ladi, chunki qo'zg'atish chulg'ami yakor chulg'amiga ketma-ket ulangan bo'ladi; aralash qo'zg'atishli turida (27.5,*e*-rasm), salt ishlash rejimda mashinaning asosiy magnit maydonini parallel qo'zg'atishli chulg'am hosil qiladi, yuklama bilan ishlaganda esa qo'zg'atish maydonini parallel va ketma-ket qo'zg'atish chulg'amlarining natijaviy maydoni tufayli hosil bo'ladi.

O'T mikromashinalarining ko'pchiligida mashinaning asosiy maydoni doimiy magnit vositasida hosil qilinadi (27.5,*f*-rasm). Bu holda mashinaning qo'zg'atish chulg'ami vazifasini doimiy magnit bajaradi.

O'zgarmas tok mashinasining generator rejimda ishlash prinsipi. O'T mashinasining rotori birlamchi motor bilan aylantirilganda yakor chulg'ami o'tkazgichlari qo'zg'atgich chulg'ami magnit maydonini kesib o'tishi tufayli ularning har birida elektromagnit induksiya hodisasiga binoan o'zgaruvchan EYK hosil bo'ladi. Uning oniy qiymati quyidagiga teng:

$$e = B\,l\,v, \qquad (27.1)$$

bunda B – magnit maydon induksiyasi; *l* – o'tkazgichning uzunligi; v – tezlik.

EYK ning yo'nalishi "o'ng qo'l" qoidasi (K.2,*a*-rasm) bilan aniqlanadi.

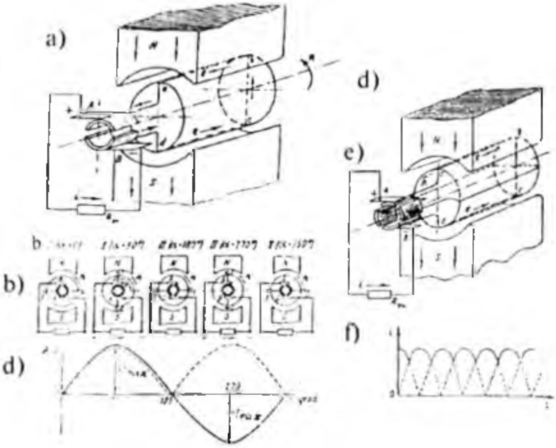
Yakorning burchak tezligi v (yoki aylanish chastotasi *n*) o'zgarmas bo'lsa yakor chulg'ami EYK ning kattaligi va yo'nalishi mashina havo oralig'i magnit induksiyasining kattaligi va yo'nalishi bilan aniqlanar ekan.

O'T generatorining ishlash prinsipini eng oddiy O'T generatori misolida ko'rib chiqamiz (27.6-rasm). Bunda mashinaning magnit

qutblari orasida erkin aylanadigan po'lat silindrga ikkita ("*ab*" va "*cd*") o'tkazgichning ketma-ket ulanishidan hosil bo'lgan bitta o'ram o'rnatilgan bo'lib, u yakor chulg'amining eng oddiy bir qismidir. Yakor o'ramining uchlari 2 ta yarim halqaga ulangan. Yarim halqalarga 2 ta qo'zg'almas cho'tka tegib turadi. Yakor aylantirilganda yarim halqalar o'tkazgichlar bilan mos aylanadi. Mazkur yarim halqalar ko'rilayotgan oddiy O'T mashinasining kollektoridir.

O'tkazgichda hosil bo'lgan EYK ning vaqt bo'yicha o'zgarish grafigi mashina havo oralig'ida magnit induksiyaning taqsimlanish shakliga mos keladi.

Yakor aylanganda uning chulg'am o'tkazgichlari ("*ab*","*cd*") magnit maydonda magnit induksiyaning kattaliklari har xil bo'lgan holatlarni egallaydi (27.6,*b*-rasm). Bunda o'tkazgichlar har xil magnit qutblar tagidan o'tgani tufayli unda hosil bo'lgan EYK va, demak, yakor chulg'amidagi tok ham sinusoidal shaklda o'zgaruvchan bo'ladi.



27.6-rasm. *Yakor chulg'ami bitta o'ram (2 ta o'tkazgich)dan iborat bo'lgan eng oddiy o'zgarmas tok generatorining modeli (**a**); yakor bitta aylantirilganda o'tkazgichlarning magnit maydondagi holatlari (**b**) va o'zgarmas EYK (yoki tok) ning hosil bo'lishi (**d**); yakor chulg'ami fazoda bir-biriga nisbatan 90° da joylashgan ukkita o'ram (4 ta o'tkazgich)dan iborat bo'lganda (**e**), tashqi zanjirda EYK (yoki tok) pulsatsiyalanishining keskin kamayishi (**f**).*

Yakor 180° ga burilganda o'ramdagi EYK (yoki tok) ning yo'nalishi teskariga o'zgaradi. Lekin cho'tkalar qutbiyligi (ishorasi) va zanjirning tashqi qismida tokning o'z yo'nalishini o'zgartirgan paytda cho'tkalar tagidagi kollektor plastinalarining ham joyi almashinadi.

Shunday qilib, "A" cho'tka tagida hamma vaqt shimoliy qutb ta'siridagi, "B" cho'tka tagida esa janubiy qutb ta'siridagi o'tkazgich ulangan plastina turadi. Natijada O'T generatorida yakor chulg'amidagi o'zgaruvchan tok kollektor va cho'tkalar vositasida zanjirning tashqi qismidagi pulsatsiyalanadigan tokka aylantiriladi (27.6,*d*-rasm).

Agar yakor chulg'ami fazoda bir-biriga nisbatan 90° da joylashgan ikkita o'ramdan iborat bo'lsa (27.6,*b*-rasm), tashqi zanjirda tokning pulsatsiyalanishi keskin kamayadi (27.6,*d*-rasm).

Albatta, yakor chulg'ami bitta yoki ikkita o'ramdan emas, balki bir necha o'ramdan iborat bo'ladi. Natijada tokning tashqi zanjirdagi pulsatsiyasi keskin kamayadi. Masalan, chulg'amdagi o'tkazgichlar soni 16 ta (o'ramlar soni 8 ta) bo'lsa, tokning pulsatsiyasi sezilmay qoladi va generatorning tashqi zanjiridagi EYK (yoki tok) ni faqat yo'nalishi bo'yicha emas, balki kattaligi bo'yicha ham o'zgarmas deyish mumkin bo'ladi.

Yakor chulg'amiga yuklama ulanganda o'tadigan tok asosiy maydon bilan ta'sirlashib <u>elektromagnit kuch va moment</u> hosil qiladi. Elektromagnit kuchning qiymati Amper qonuniga binoan quyidagi formula bo'yicha aniqlanadi:

$$F_{em} = B_{o'rt}\, \ell\, I_a \,. \qquad (27.2)$$

Bu kuchning yo'nalishi "chap qo'l qoidasi" (K.2,*b*-rasm) bo'yicha aniqlanadi. Bu kuch hosil qilgan elektromagnit moment quyidagiga teng bo'ladi:

$$M = F_{em} \cdot D / 2 = C_m \Phi I_a \,. \qquad (27.3)$$

bunda $D / 2$ – yakorning radiusi; $C_m = pN/(2\pi a)$ – mashina konstruksiyasiga bog'liq bo'lgan o'zgarmas son. Mashina generator rejimida ishlaganda bu moment tormozlovchi ta'sir etadi.

27.2. Yakor chulg'amlari va ularning turlari

Qo'zg'atish chulg'ami hosil qilgan magnit maydonda aylanishi natijasida chulg'amda EYK hosil bo'ladigan qismi *O'T mashinasining*

yakori deyiladi. O'T mashinalarida *barabanli yakor* qo'llaniladi. Bunday yakor chulg'amining o'tkazgichlari magnit o'tkazgichining tashqi silindrik sirtidagi pazlarda joylashadi. Bu chulg'amda ketma-ket ulangan alohida elementlar yakorning butun aylanasi bo'yicha bir tekis taqsimlangan bo'ladi.

Yakor chulg'amining asosiy elementi seksiyadir. U bir-biridan izolatsiyalangan bir yoki bir necha o'ramlardan iborat bo'ladi. Chulg'amdagi hamma seksiyalar odatda bir xil sondagi o'ramlar w_s ga teng bo'ladi. Seksiyalarning pazlarda yotgan qismi uning *aktiv tomonlari* deb, ularni birlashtiruvchi qismlari esa pazlardan *tashqari tomonlari* deb ataladi.

Chulg'amning pazlardan *tashqari tomonlarini* joylashtirish qulay bo'lishi uchun yakor chulg'ami *ikki qatlamli* qilib tayyorlanadi. Yakorning tashqi sirtiga yaqin joylashgan qatlamni *yuqorigi qatlam* deb ataymiz. Bunda har qaysi seksiyaning chapdagi aktiv tomonini bir pazning yuqorigi qatlamida, o'ng tomondagi aktiv tomonini esa chulg'am qadamiga teng masofadagi boshqa pazning *pastki qatlamida* joylashtiriladi. Chulg'am qadami taxminan qutb bo'linmasining eni τ ga teng ($y_1 \approx \tau$) bo'ladi (27.7,*b*-rasm). *Qutb bo'linmasi* – bu qo'shni geometrik neytral chiziqlari orasidagi yakor aylanasi bo'yicha o'lchangan masofadir, ya'ni $\tau = \pi D_a / (2p)$, [m].

Seksiyalarning uchlari kollektor plastinalariga ulanadi, bunda har qaysi plastinaga bitta seksiyaning boshi va ikkinchi bir seksiyaning oxiri ulanadi, ya'ni har qaysi seksiya (S)ga bitta kollektor plastinasi (K) to'g'ri keladi (S=K).

Sxemalar tuzish, ularni o'qish va yakor chulg'ami tayyorlash qulay bo'lishi uchun "elementar paz" tushunchasi kiritiladi. *Elementar paz* – bu real pazda bir-birining ustida yuqorigi va pastki qatlamlarda joylashgan (27.7-rasm) turli seksiyalarning ikkita aktiv tomonidir. Real pazda bitta yoki bir necha elementar paz (u_r) bo'lishi mumkin. *Eng oddiy holda* real pazda bitta elementar paz (u_r=1) turadi, demak, $Z = Z_e$ bo'lganligidan quyidagini yozish mumkin:

$$Z = Z_e = S = K, \tag{27.4}$$

biroq to'g'rilangan kuchlanish va tokning pulsatsiyalanishini kamaytirish maqsadida pazning har qaysi qatlamida yonma-yon tarzda seksiyalarning bir necha ($u_r = 2 \div 5$) tomonlari joylashtiriladi. Bunda

elementar pazlar va kollektor plastinalari soni real pazlar soniga qaraganda u_r marta ko'payadi:

$$Z_c = u_p \cdot Z = S = K, \qquad (27.5)$$

bu yerda u_n – bitta real pazdagi elementar pazlar soni.

Chulg'amlarni hisoblashda mashina qutb bo'linmasining uzunligi τ ni elementar pazlar soni orqali ifodalash qulaydir, ya'ni

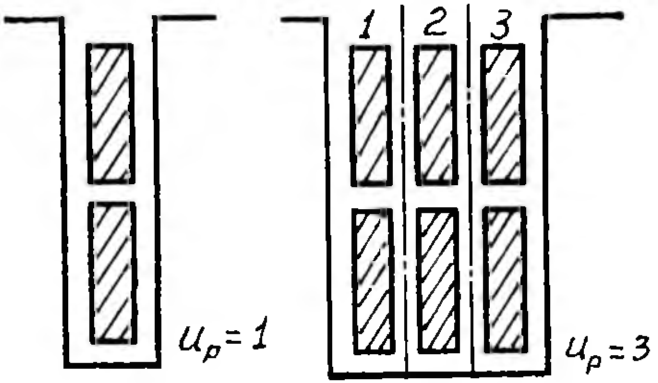
$$\tau = Z_c / (2p). \qquad (27.6)$$

Ma'lumki, yakor chulg'amlarining o'tkazgichlarida elektromagnit induksiya hodisasiga binoan o'zgaruvchan EYK lar hosil bo'ladi va EYK o'zgarishining har bir davriga mashina qutblarining bir jufti " *p* " to'g'ri kelganligi sababli, geometrik va elektr burchaklarini umumiy holda quyidagicha yozish mumkin: 360° geom.= p·360° el., bundan $\alpha^{\circ}_{geom} = p \cdot \alpha^{\circ}_{el}$.

Seksiyalarning shakli va ularning kollektorga biriktirilish usullariga ko'ra yakor chulg'amlarining *sirtmoqsimon*, *to'lqinsimon* va *aralash* turlari mavjuddir. Sirtmoqsimon va to'lqinsimon chulg'amlar *oddiy* va *murakkab* ko'rinishda tayyorlanishi mumkin.

Aralash chulg'am – murakkab to'lqinsimon va oddiy sirtmoqsimon chulg'amlarning parallel ulanishidan iborat bo'ladi.

Chulg'amni yakorga to'g'ri joylash va uni kollektorga to'g'ri ulash uchun chulg'amlarning elementar pazlar soni bilan o'lchanadigan, yakor bo'yicha "y_1, y_2, y" qadamlarini va kolektor plastinalari soni



27.7-rasm. *Yakorning bitta (**a**) va uchta (**b**) elementar pazdan tarkib topgan real pazlari.*

bilan o'lchanadigan kollektor bo'yicha qadam "y_k" ni bilish zarur bo'ladi (27.8-rasm).

Sirtmoqsimon chulg'amning birinchi qisman qadami (y_1) chulg'am seksiyasining ikkita aktiv tomoni orasidagi masofa (seksiya eni) ga teng va u butun son (b.s.) bo'lishi shart:

$$y_1 = Z_e / (2p) \pm \varepsilon = \text{b.s.}, \qquad (27.7)$$

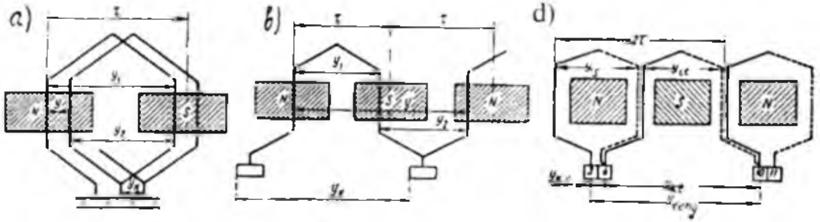
bu yerda ε – birdan kichik son bo'lib, butun son hosil qilish uchun seksiyaning eni (u_1) ε soniga kamaytiriladi yoki uzaytiriladi; ($+\varepsilon$) bo'lganida chulg'am *uzaytirilgan qadamli* ($y_1 > \tau$), ($-\varepsilon$) bo'lganida *qisqartirilgan qadamli* ($y_1 < \tau$), $\varepsilon = 0$ bo'lganida esa *to'la qadamli* ($y_1 = \tau$) *chulg'am* deyiladi.

Qisqartirilgan qadamli chulg'amning pazlardan tashqari qismlari uzunligi to'la qadamlinikiga nisbatan biroz kam bo'ladi; bunda mis kamroq sarflanadi va kommutatsiyaning borishiga ijobiy ta'sir etadi, shuning uchun ham *amalda qisqartirilgan qadamli chulg'am ma'qul ko'riladi.*

Chulg'amning ikkinchi qisman qadami (y_2) quyidagicha aniqlanadi:

$$y_2 = y_1 - y. \qquad (27.8)$$

Chulg'amning natijaviy qadami (u) ketma-ket ulangan ikkita seksiyaning birinchi aktiv tomonlari orasidagi masofaga teng:



27.8-rasm. *O'zgarmas tok mashinasi yakor chulg'amlarining elementlari va qadamlari:* ***a*** *– sirtmoqsimon (parallel);* ***b*** *– to'lqinsimon (ketma-ket);* ***d*** *– aralash (murakkab to'lqinsimon va oddiy sirtmoqsimon turlarining parallel ulanishidan hosil bo'lgan);* y_{teng} *= K/p – potensial qadam (ya'ni potensiallari bir xil bo'lgan nuqtalararo qadami).*

a) *oddiy* sirtmoqsimon chulg'am uchun

$$y = y_k = \pm 1 ; \quad (27.9)$$

b) *murakkab* sirtmoqsimon chulg'am uchun

$$y = y_k = \pm m , \quad (27.10)$$

bunda: m — chulg'am yo'llari soni.

Chulg'amning kollektor bo'yicha qadami (y_k) bir seksiyaning boshi va oxiri ulangan kollektor plastinalari orasidagi masofaga teng va (27.9, 27.10) lar bo'yicha hisoblanadi. Bu tengliklarda («+») ishora o'ng yo'lli chulg'amga, («—») ishora esa chap yo'lli chulg'amga taalluqli ekanligini bildiradi.

Katta quvvatli O'T mashinalarida chulg'am o'rami ikki va undan ortiq seksiyalardan iborat bo'ladi. Bu holda pazlar bo'yicha qadam (y_{1Z}) quyidagicha aniqlanadi:

$$y_{1Z} = Z / (2 p) \pm \varepsilon = \text{b.s.}, \quad (27.11)$$

Bu qadam seksiya tomonlari orasida joylashgan real pazlar soni bilan o'lchanadi. Agar pazlar soni qutblar soniga qoldiqsiz bo'linmasa, u holda qadamni eng yaqin kichik songa yaxlitlanadi.

Chulg'am seksiyalari amalda yakor aylanasi bo'yicha chapdan o'ngga qarab joylashtirilsa *o'ng yo'lli chulg'am* bo'lib, misdan biroz tejaladi.

Yakor chulg'ami seksiyalarini pazlarga joylashtirib kollektor bilan ulagandan keyin tenglashtiruvchi ulanishlar qo'yiladi; u parallel shoxobchalarning bir jufti «*a*» ga mos keladigan seksiyalar yoki kollektor plastinalari soni bilan o'lchanadi.

Chulg'amlarning simmetriya shartlari. Mashinaning ishlashiga eng yaxshi sharoitlar yaratib berish uchun chulg'amning hamma parallel shoxobchalarining EYK lari va ularning qarshiliklari bir xil bo'lishi zarur. Bu holda barcha parallel shoxobchalarning toki i_a bir xil va quyidagiga teng bo'ladi:

$$i_a = I_a / (2a), \quad (27.12)$$

buning uchun ular bir xil magnit sharoitida bo'lishi kerak. *Bu talablarni qondiruvchi chulg'am simmetrik chulg'am deyiladi.* Bunda:

1. Yakorda pazlar bir tekis taqsimlanishi kerak:

$$S / Z = K / Z = \text{b.s.} \quad (27.13)$$

2. Ko'p qutbli ($p > 1$) mashinalarda chulg'amning har qaysi juft parallel shoxobchalari tarkibida butun songa teng bo'lgan bir xil

seksiyalar va kollektor plastinalari bo'lishi kerak:

$$S / a = K / a = \text{b.s.}, \qquad (27.14)$$

3. Har qaysi parallel shoxobchaning seksiyalari yakorda bir xil sondagi pazlarni egallashi kerak:

$$Z / a = \text{b.s.}, \qquad (27.15)$$

4. Chulg'amning simmetrik joylashgan parallel shoxobchalari magnit maydonida bir xil vaziyatda bo'lishi kerak:

$$2p / a = \text{b.s.}, \qquad (27.16)$$

(27.13)÷(27.16) tengliklar O'T mashinalari *yakor chulg'amlarining simmetriya shartlaridir*. Bu simmetriya shartlari bajarilmasa chulg'am nosimmetrik bo'lib, undan va cho'tkalardan mashinaning ishiga salbiy ta'sir etuvchi tenglashtiruvchi toklar o'tadi.

27.1-jadval

Chulg'amning nomi	***O'zgarmas tok mashinasi chulg'amlari uchlarining belgilanishi***			
	01.01.1987-yilgacha ishlab chiqarilgan va modernizatsiya qilinadigan mashinalar uchun (***Ilgarigi***)		***01.01.1987-yildan keyin*** ishlab chiqarilgan mashinalar uchun (***Yangi***)	
	Boshi	Oxiri	Boshi	Oxiri
Yakor chulg'ami	YA1	YA2	A1	A2
Mustaqil qo'zg'atish chulg'ami	N1	N2	F1	F2
Parallel qo'zg'atish chulg'ami	SH1	SH2	E1	E2
Ketma-ket qo'zg'atish chulg'ami	S1	S2	D1	D2
Qo'shimcha qutblar chulg'ami	D1	D2	V1	V2
Kompensatsion chulg'am	K1	K2	S1	S2

O'zgarmas tok mashinasi chulg'amlari uchlarining belgilanishi.

Xalqaro standartga moslashtirib ishlab chiqilgan standart (GOST 26772–85)ga muvofiq 1.01.1987 dan MDH mamlakatlari elektr mashinasozligi zavodlarida ishlab chiqarila boshlagan O'T mashinalari chulg'amlari uchun yangicha belgilanish joriy qilingan (27.1-jadval).

27.3. O‘zgarmas tok mashinalari chulg‘amlarini hisoblash tartibi

O‘TM chulg‘amlarini hisoblash quyidagicha amalga oshiriladi.

1. (27.13)÷(27.16) tengliklar bo‘yicha chulg‘am simmetriya shartlari tekshiriladi.

2. (27.7) ÷ (27.9) formulalar bo‘yicha chulg‘amning qadamlari aniqlanadi.

3. Chulg‘amning yoyilma sxemasi chiziladi, buning uchun:

a) yakor pazlari seksiyalarining aktiv tomonlari bilan sxematik tarzda chiziladi;

b) seksiyaning aktiv tomonlari ulangan kollektor plastinalari shu seksiyaga nisbatan simmetrik qilib joylashtiriladi;

d) seksiyalar va pazlar (1-seksiyaning yuqori qatlami 1-pazda, 2-seksiyaning yuqorigi qatlami 2-pazda va hokazo tarzda joylashadigan qilib) hamda kollektor plastinalari nomerlab chiqiladi (pazni nomerlash ixtiyoriy bo‘lib, uni xohlagan pazdan boshlash mumkin);

e) tish bo‘linmalari birligida o‘lchangan qutb bo‘linmasi $\tau_Z = Z/(2p)$ aniqlanadi va yakor yoyilmasi bo‘yicha geometrik neytralni bir-biridan «τ» masofada joylashtirib, qutblarning ta’sir zonasi chegaralanadi. Qutbning eni (b_m) taxminan $b_m \approx 0,8\tau_Z$ ga teng qilib olinadi;

f) yakorga hamma seksiyalarni oldin aniqlangan y_1, y, y_2, y_k qadamlar bo‘yicha joylashtirib chiqiladi;

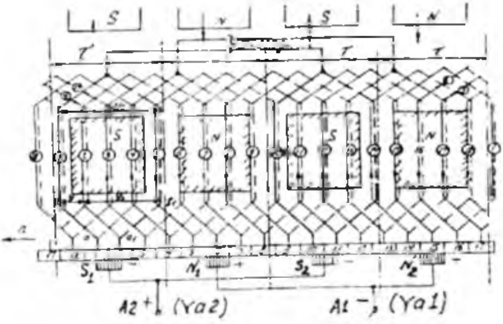
g) cho‘tkalar joyiga qo‘yiladi va ularning qutbiyligi (ishorasi) aniqlanadi. Buning uchun yakorning aylanish yo‘nalishi va qutblarning ishorasi ixtiyoriy tanlanadi. So‘ngra “o‘ng qo‘l” qoidasiga ko‘ra (K.3,*a-rasm)*, yakor chulg‘ami o‘tkazgichlaridagi EYK larning yo‘nalishi aniqlanadi (27.9-rasm);

h) bir necha tenglashtiruvchi ulanishlar qo‘yib chiqiladi (27.9-rasm).

4. Chulg‘amning yoyilgan sxemasi bo‘yicha, uning prinsipial elektr sxemasi tuziladi. Sxemani chizish ixtiyoriy cho‘tkadan boshlanadi va shu cho‘tkaning o‘zida tugallash kerak bo‘ladi (27.9-rasm).

27.4. Sirtmoqsimon chulg‘amlar

Oddiy (bir yo‘lli) sirtmoqsimon chulg‘amda har qaysi seksiyaning boshi va oxiri yonma-yon yotgan ikkita kollektor plastinalariga ulangan



27.9-rasm. *Oddiy o'ng yo'lli sirtmoqsimon chulg'amning yoyilma sxemasi ($S = K = 18$, $2p = 4$, $u_p = 1$);*
1 teng *— 1 tur tenglashtirgichlar.*

bo'ladi. Bunda har qaysi oldingi seksiyaning oxiri keyingi seksiyaning boshi bilan ulanadi va shu tarzda chulg'am so'nggi seksiyasining oxiri birinchi seksiyaning boshi bilan, ya'ni chulg'am tutashgunga qadar yakor aylanasi bo'yicha (kollektor bo'yicha ham) ulab boriladi.

27.1-m i s o l. Seksiyalari bir o'ramli, oddiy, o'ng yo'lli, ikki qatlamli sirtmoqsimon chulg'amni $Z=18$, $2p = 4$, $y_p=1$, $2a = 2p$ berilganlar bo'yicha hisoblash, yoyilma va elektr sxemalarini chizish talab etilgan bo'lsin.

Buning uchun (27.13)÷(27.16) lar bo'yicha chulg'amning simmetriya shartlarini tekshiramiz: $S_3= 18/18 =1$; $S_4= 18/2 =9$; $S_5=18/2 =9$; $S_6= 4/2= 2$, demak, $S_3 \div S_6$ lar b.s., binobarin, hamma simmetriya shartlariga rioya qilingan.

Berilgan chulg'amni hisoblash yuqorida keltirilgan tartibda quyidagicha amalga oshiriladi.

Oddiy o'ng yo'lli sirtmoqsimon chulg'am uchun (27.9) formulaga muvofiq $y = y_k = +1$. Elementar pazlar soni $y_p = 1$ bo'lgani uchun (27.4) formulaga ko'ra

$Z_e = Z = S = K = 18$ ga ega bo'lamiz.

Chulg'amning birinchi y_1 va ikkinchi u_2 qadamlarini (27.7 va 28.8) formulalar bo'yicha hisoblaymiz: $y_1= Z_e /(2p) \pm \varepsilon = 18/4 \pm 2/27$. Chulg'am qadami butun son bo'lishi shart, shu boisdan $y_1 = 4$ deb qabul qilamiz, ya'ni qisqartirilgan qadam olamiz, chulg'amning ikkinchi qadami esa $y_2 = y_1 - y = 4 - 1 = 3$ ga teng bo'ladi.

Mazkur chulg'amni yoyilma sxema tarzida chizish uchun tekislikda 18 ta vertikal to'g'ri chiziq o'tkazamiz, ular *elementar pazlarni* tasvirlaydi. Bunda tutash chiziqlar seksiyaning birinchi aktiv

tomonini, ya'ni pazdagi chulg'amning yuqorigi qatlamini, punktir chiziqlar esa shu pazda joylashgan boshqa seksiyaning ikkinchi aktiv tomonini ifodalaydi. Seksiyalarni (ularning boshi bo'yicha) va kollektorlarni chapdan o'ngga tomon nomerlaymiz.

Elementar pazlarning yuqorigi qatlamida yotuvchi seksiyalarning 1-tomonlari bilan ulangan kollektor plastinalarini bir xil raqamlar bilan belgilaymiz va 1-kollektor plastinasidan boshlaymiz. Uni 1-seksiyaning boshi bilan tutash chiziq yordamida birlashtiramiz. Bu seksiyaning ikkinchi tomoni ($1 + y_1 = 5$)- elementar pazning pastki qatlamida yotadi va 2-kollektor plastinasi ($5-y_2=2$) ga punktir chiziq bilan ulanadi. Xuddi shu plastinaga 2-seksiyaning boshini ulaymiz, so'ngra yana $y_1= 4$ qadam tashlab, bu seksiyaning oxirini ($2+y_1= 6$)-elementar pazning pastki qatlamiga joylashtiramiz va hokazo. Nihoyat, so'nggi, ya'ni 18-seksiyaning boshini 18-elementar pazning yuqorigi qatlamiga, oxirini esa 4-pazning pastki qatlamiga joylashtiramiz va 1-chulg'am boshlangan kollektor plastinasiga ulaymiz. Natijada chulg'am butunlay tutashtirilgan bo'ladi (27.9-rasm).

Oddiy sirtmoqsimon chulg'amda kollektor plastinalari quyidagicha joylashtiriladi. Masalan, 1-kollektor plastinani simmetrik joylashtirish uchun:

a) 1 va 2-kollektor plastinalarini ajratib turuvchi chiziq oddiy chulg'amlarda 1- seksiya o'qi bilan ustma-ust tushishi kerak;

b) seksiyaning har ikki uchlarining uzunligi bir xil, ya'ni $ab = a_1b_1$ bo'lishi kerak (27.9-rasm).

Bizning misolimizda yoyilma chizig'i 18 va 1-pazlar orasida joylashgan geometrik neytral bilan ustma-ust tushgan.

Barcha seksiyalarni ulab bo'lgandan keyin sxemada qutblar tasvirlanadi; ularning o'rtasi (o'qi) bir-biridan τ masofada bo'ladi.

Magnit maydon kuch chiziqlarining yo'nalishini odatda shimoliy qutb N dan yakor chulg'ami tomon chiqib, janubiy qutb S ga kiradigan qilib olinadi. Yakor soat strelkasiga teskari yo'naladi deb olamiz va EYK larning yo'nalishini seksiyaning yuqorigi qatlamlarida ko'rsatish tavsiya etiladi.

Sxemaning eng muhim jihatlaridan biri, unda cho'tkalarning to'g'ri joylashtirilishidir. Cho'tkalarni kollektorning aylanasi bo'ylab geometrik neytrallarda mutlaqo bir tekis o'rnatish zarur. Bunda

yakordagi neytral bilan kollektordagi neytralni bir-biridan ajrata bilish zarur.

Yakordagi neytral — mashinaning geometrik neytrali, *kolleklordagi neytral* esa mazkur cho'tkaning ro'parasidagi qutb o'qi bilan ustma-ust tushadigan chiziqdir.

Chulg'amning qadami to'la bo'lgandagina seksiyaning tomonlari geometrik neytral chiziqlari bilan ustma-ust tushadi, chulg'am qisqartirilgan qadamli bo'lganda esa bu tomonlar geometrik neytral yaqinida yotadi. Seksiyaning pazlardan tashqarida joylashgan qismi simmetrik ulangan bo'lsa cho'tkalar kollektorga qutblarning o'qi bo'yicha o'rnatiladi. Ko'rib chiqilayotgan onda cho'tkalar orqali qisqa tutashgan seksiyalar neytral zonalarda yotadi (27.9-rasm).

Qolgan qutblar va cho'tkalarning o'qlari biri undan keyingisidan 180 el. gradusli yoy masofasida turishi, ya'ni qutblar Z_c / (2r) seksiya masofasida (ko'rilayotgan misolda — 18 / 4 =4,5), cho'tkalar esa K / (2p) kollektor plastinalari masofasi (ko'rilayotgan holda — 18 / 4 = 4,5)da turishi kerak.

Oddiy sirtmoqsimon chulg'amlarda cho'tkalar soni qutblar soniga teng.

Yakor chulg'amining parallel shoxobchalari. Yakorning aylanish yo'nalishini belgilab o'ng qo'l qoidasi bo'yicha EYK lar yo'nalishi aniqlanadi. Cho'tkalarning ishorasini aniqlashda qaysi cho'tka (yoki cho'tkalar)dan tashqi zanjirga tok yo'nalgan bo'lsa u (yoki ular) musbat ishorali (ko'rilayotgan holda V_1 va V_2 cho'tkalar), qolgan (A_1 va A_2) cho'tkalar esa manfiy ishorali hisoblanadi. Bir xil ishorali cho'tkalar parallel ulanib mashinaning tegishli klemmalariga chiqariladi.

Oddiy chulg'amlarda har bitta cho'tkaning eni bitta kollektor plastinasi enidan kichik bo'lmasligi kerak, masalan, elementar pazlari y_p >1 bo'lgan oddiy sirtmoqsimon teng seksiyali chulg'amda cho'tkalarning eni «y_p» ta kollektor plastinani yopadigan bo'lishi kerak.

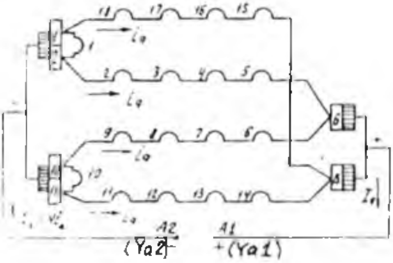
To'rtta cho'tkani to'rtta qutbning ostiga o'rnatgandan keyin (chunki bizning misolimizda 2p = 4) sxema bo'yicha yakor chulg'amining seksiyalarida (27.9-rasm) EYK (yoki tokning) yo'nalishini kuzatib, oddiy sirtmoqsimon chulg'amning parallel shoxobchalari sonini aniqlash mumkin.

Parallel shoxobcha chulg'amning ikkita turli ishorali qo'shni cho'tkalari orasida ketma-ket ulangan, hamda EYK (yoki toki) bir xil yo'nalishga ega bo'lgan, bir necha seksiyadan iborat qismdir.

Parallel shoxobchalar ulanishlarining elektr sxemasi 27.9-rasmdagi yoyilma sxema yordamida chiziladi. Qog'oz varag'ining bir tomonida bir xil ishoradagi (faraz qilaylik manfiy) cho'tkalar va ular tegib turgan kollektor plastinalari ko'rsatiladi, o'ng tomonda esa musbat ishorali cho'tkalar joylashtiriladi.

So'ngra 1-seksiyadan boshlab chulg'am seksiyalarini aylanib chiqish boshlanadi.

Bu seksiyalar ko'rilayotgan onda A_1 cho'tka bilan qisqa tutashgan



27.10-rasm. *21.9-rasmda ko'rsatilgan chulg'am parallel shohobchalari ulanishining prinsipial elektr sxemasi.*

bo'ladi va shuning uchun u ishchi seksiya bo'la olmaydi. Keyin 2, 3, 4 va 5-seksiyalari keladi, ular o'zaro ketma-ket ulanadi va bitta parallel shoxobchani hosil qiladi. 5-seksiya musbat ishorali V_1 cho'tka o'rnatilgan 6-kollektor plastinasi bilan ulanadi. Xuddi shu tartibda butun chulg'am aylanib chiqiladi.

Tahlil qilinayotgan chulg'am to'rtta parallel shoxobchadan iborat. Oddiy sirtmoqsimon chulg'amda parallel shoxobchalar soni doimo mashina qutblari soniga teng bo'ladi, ya'ni

$$2a = 2p. \qquad (27.17)$$

Ikki qo'shni pazlar orasidagi siljish burchagi α quyidagiga teng:

$$\alpha = (360p) / S. \qquad (27.18)$$

Murakkab sirtmoqsimon chulg'amda, masalan, ikki yo'lli (m=2) chulg'amda, har qaysi oldingi toq nomerli seksiyaning oxiri keyingi toq nomerli seksiyaning boshi bilan va keyingi toq seksiyalar ham shu tarzda ulanib borilganda so'nggi toq seksiyaning oxiri 1-toq nomerli seksiyaning boshi bilan ulanib, ikki yo'lli chulg'amning 1-yarmini

hosil qiladi. Juft nomerli seksiyalarni shu tartibda ulab chulg'amning 2-yarmi hosil qilinadi.

27.5. To'lqinsimon chulg'amlar

Oddiy to'lqinsimon chulg'am. To'lqinsimon chulg'amlar turli qutblar ostida joylashgan seksiyalarni ketma-ket ulash natijasida hosil bo'ladi, shuning uchun ularni *ketma-ket* chulg'amlar deyiladi.

To'lqinsimon chulg'amlarning *o'ziga xos xususiyati shundan iboratki*, seksiyalarning uchlari sirtmoqsimon chulg'amlardagidek qo'shni kollektor plastinalariga emas, balki taxminan (2τ) ga teng masofada joylashgan ikki kollektor plastinasiga ulanadi. Yakorni bir aylanib chiqishda mashinada qancha juft qutblar " *p* " bo'lsa, shuncha seksiya joylashtiriladi. To'lqinsimon chulg'amning seksiyalari bir o'ramli va ko'p o'ramli (2 va undan ortiq) bo'lishi mumkin.

Oddiy (bir yo'lli) to'lqinsimon chulg'amlar uchun chulg'amning natijaviy qadami " *y* " kollektor bo'yicha qadami " y_k " ga teng bo'ladi:

$$y_k = y = (K \pm 1) / p = (y_r Z \pm 1) / p, \qquad (27.19)$$

bu yerda K — kollektor plastinalari soni; *p* — mashina juft qutblari soni.

(27.19) formuladagi minus " — " ishora yakor seksiyalari va kollektor plastinalarini ulash jarayonida yakor bo'yicha bir marta aylangandagi oxirgi kollektor plastinasi 1-plastinadan chapda joylashganini bildiradi. Shuning uchun manfiy ishora chap yo'lli chulg'amga, musbat ishora esa o'ng yo'lli chulg'amga mos keladi. O'ng yo'lli chulg'am tayyorlashda mis ko'proq sarf bo'lganligi sababli, *amalda chap yo'lli to'lqinsimon chulg'amlar qo'llaniladi*.

Simmetrik to'lqinsimon chulg'amda $y_k = y$ qadam butun sondan iborat bo'lishi kerak. Bu shartga rioya qilish uchun (27.19) formula "*p*" juft bo'lganida K toq bo'lishi kerak va aksincha. Juft qutblar soni p = 2 bo'lganida p_r faqat toq son bo'lishi kerak.

To'lqinsimon chulg'amning birinchi qadami p_1, sirtmoqsimon chulg'amdagidek, (27.6) formula bilan aniqlanadi, ya'ni $p_1 = Z_c / (2p) \pm \varepsilon$.

To'lqinsimon chulg'amning ikkinchi qadami p_2 quyidagicha hisoblanadi:

$$y_2 = y - y_1 . \qquad (27.20)$$

Quyida oddiy ikki qatlamli to'lqinsimon chulg'amni ko'rib chiqamiz.

27.2-m i s o l. Yakor chulg'amining berilgan qiymatlari: $Z = Z_e = S = K = 17$, $y_1 = 1$, $2p = 4$. Ulanish turi – oddiy chap yo'lli to'lqinsimon chulg'am. Seksiyalar bir o'ramli. Chulg'amning sxemasini va parallel shoxobchalari sxemasini chizish talab qilinadi.

Chulg'am qadamlarini hisoblashda (27.6), (27.19) va (27.20) lardan foydalaniladi, ya'ni: $y_1 = Z_p / (2p) \pm \varepsilon = 17 / 4 - 1 / 4 = 4$;

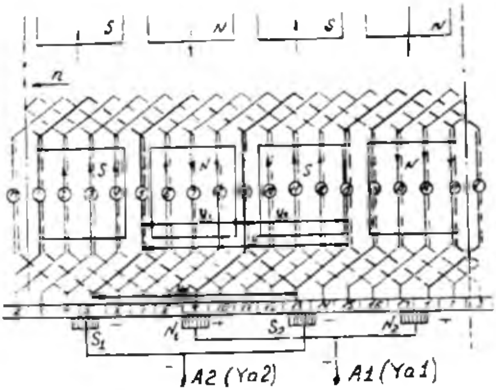
$y_k = y = (K-1) / p = (17-1) / 2 = 8$; $y_2 = y - y_1 = 8 - 4 = 4$.

To'lqinsimon chulg'amlarda cho'tka va qutblarni joylashtirish tartibi sirtmoqsimon chulg'amlardagidan *biroz farq qiladi*. To'lqinsimon chulg'amlarda cho'tkalar qutblarga nisbatan simmetrik joylashgan seksiyalarni qisqa tutashtirish shartini aniq bajarish mumkin emas, chunki cho'tkalar bilan qisqa tutashtirilgan ayrim seksiyalar bu yerda magnit maydonida biroz siljib qoladi va, binobarin, ular ayni bir vaqtda qutblarga nisbatan simmetrik joylasha olmaydi.

Shu boisdan quyidagi usul tavsiya etiladi:

qutblardan ixtiyoriysini birinchi aylanib o'tiladigan yo'lning boshi va oxiriga nisbatan simmetrik joylashishi zarur.

Demak, berilgan misolda bitta cho'tka 17 va 1-plastinalar orasida o'rnatilishi kerak. Qolgan qutblari ham shu tarzda 1-misoldagidek chiziladi va ularning o'rtasiga boshqa cho'tkalar qo'yib chiqiladi. Qutb va cho'tkalarning yakorga nisbatan bunday joylashuvi vaqtning faqat bir oniga to'g'ri keladi, seksiya o'tkazgichlaridagi tokning yo'nalishi



27.11- rasm. *Oddiy chap yo'lli to'lqinsimon chulg'am sxemasi ($Ze = S = K = 17$; $2p = 4$; $y_1 = 4$; $y = y_k = 8$).*

esa mashinaning generator rejimida ishlashini va aylanish yo'nalishi soat strelkasiga teskari yo'nalganligini hisobga olib ko'rsatilgan.

Oddiy to'lqinsimon chulg'am parallel shoxobchalarini ulash elektr sxemasini qurish 27.1-misoldagidek (27.3-bandga qarang) amalga oshiriladi.

Oddiy to'lqinsimon chulg'am juft qutblar soni "*p*" ning qiymatidan qat'iy nazar ikkita parallel shoxobchaga ega:

$$2a = 2. \qquad (27.21)$$

Har qaysi cho'tkaga to'g'ri keladigan tokni kamaytirish va kollektorning uzunligini qisqartirish uchun (bunda misdan tejaladi) cho'tkalarning to'la soni qutblar soniga teng qilib olinadi. Mashina klemmalaridagi kuchlanish bir parallel shoxobchaning EYK bilan aniqlanadi.

Oddiy to'lqinsimon chulg'amlarda har qaysi parallel shoxobchaning seksiyalari mashinaning hamma qutblari ostida bir tekis taqsimlangani uchun chulg'amlarni I-tur tenglashtiruvchi ulanishlarsiz tayyorlashga imkon beradi.

Murakkab to'lqinsimon chulg'am. Murakkab to'lqinsimon chulg'am bir yakorning pazlariga joylashtirilgan bir nechta oddiy to'lqinsimon chulg'amlardan iborat bo'ladi. Har qaysi to'lqinsimon chulg'amda ikkita parallel shoxobcha bo'lganligidan, murakkab chulg'amdagi parallel shoxobchalar soni:

$$2a = 2\,\text{m}, \qquad (27.22)$$

bu yerda m – murakkab chulg'amni hosil qilgan oddiy to'lqinsimon chulg'amning parallel shoxobchalari soni (mashina qutblari soniga bog'liq emas).

Murakkab chulg'amni hosil qiluvchi oddiy to'lqinsimon chulg'amlar cho'tkalar yordamida o'zaro parallel ulanadi. Ayni bir onda cho'tka bilan qoplanadigan plastinalar soni parallel juft shoxobchalar soni (a) dan katta bo'lishi kerak.

Murakkab to'lqinsimon chulg'amda natijaviy qadam va kollektor bo'yicha qadam o'zaro teng bo'lib quyidagi formuladan aniqlanadi:

$$y = y_k = (K \pm m) / p = (K \pm a) / p. \qquad (27.23)$$

Murakkab to'lqinsimon chulg'amning qolgan (y_1 va y_2) qadamlarini hisoblash formulalari oddiy to'lqinsimon chulg'amlardagidek bo'ladi.

27.6. O'zgarmas tok mashinalari yakor chulg'amlarining turlarini taqqoslash va ularni tanlash

Chulg'am turlari quyidagi mulohazalarga ko'ra tanlanadi:

1) cho'tkalar ostidan kuchli uchqun chiqmasligi uchun yakor parallel shoxobchalaridagi tok kattaligi 350 A dan oshmasligi kerak;

2) kollektor plastinalari soni haddan tashqari ko'p bo'lmasligi, plastinalarning qalinligi mexanik mustahkamlik sharti bo'yicha kamida 3,5 mm bo'lishi kerak;

3) kollektor plastinalarining eng kam sonini tanlashda, ikki qo'shni plastinalar orasidagi kuchlanish ko'pi bilan 30 V dan oshmasligi kerak.

Chulg'am turini tanlashda parallel shoxobchalari eng kam bo'lgan oddiy to'lqinsimon chulg'amlar (a =1) ma'qul ko'riladi, buning ustiga unda tenglashtiruvchi ulanishlar bo'lishi talab etilmaydi.

Yakordagi faol tomonlar soni bir xil bo'lganida generatorning EYK to'lqinsimon chulg'am qo'llanilganda sirtmoqsimon chulg'amdagidan katta bo'ladi. Masalan, to'lqinsimon va sirtmoqsimon chulg'amlar uchun quyidagilar Z_e=24 va 2p = 4 berilgan bo'lsin. U holda to'lqinsimon chulg'am qo'llanilganda har qaysi parallel shoxobchaga 12 seksiya, sirtmoqsimon chulg'am qo'llanilganda faqat 6 ta seksiya ulangan bo'ladi. To'lqinsimon chulg'am bo'lgan holdagi EYK sirtmoqsimon chulg'am bo'lgan holdagidan 2 marta katta bo'ladi.

Har qaysi parallel shoxobchadagi tokni kamaytirish uchun hamda oddiy sirtmoqsimon chulg'amda qo'shni plastinalar orasidagi kuchlanish yo'l qo'yilganidan yuqori bo'lgan hollarda parallel shoxobchalar sonini oshirish uchun murakkab sirtmoqsimon chulg'amlar ishlatiladi. Ko'pincha ikki marta tutashgan sirtmoqsimon chulg'amdan foydalaniladi.

Katta quvvatli O'T mashinalarida va og'ir ish sharoitli rejimlarda ishlatiladigan O'T mashinalari uzun ba'zan *aralash* chulg'amlar qo'llaniladi. Sirtmoqsimon chulg'amga qaraganda bu chulg'amning *asosiy afzalligi* – tenglashtiruvchi ulanishlarga hojat yo'qligidir. Tenglashtiruvchi ulanishlarni joylash qiyin bo'lgan katta tezlikli O'T mashinalarida bu juda muhimdir. Foydalanish nuqtayi nazaridan aralash chulg'amlarning eng katta kamchiligi – ularni ta'mirlash qiyinligidir.

Toki katta va kuchlanishi past bo'lganda $u_p = 1$ qiymat ishlatiladi. $U_N = 220$ V, $P_N > (30 \div 50)$ kW bo'lganda seksiyalardagi o'ramlar soni hamma vaqt $w_s = 1$ bo'lishi kerak.

Nazorat savollari:

1. *O'zgarmas tok generatorining ishlash prinsipini so'zlab bering*
2. *O'T mashinasi chulg'amlarini hisoblash qanday amalga oshiriladi?*
3. *Chulg'amlarning simmetriya shartlari nimalardan iborat?*
4. *Chulg'am turi qanday tanlanadi?*

28-BOB. O'ZGARMAS TOK MASHINASINING MAGNIT MAYDONI VA YAKOR REAKSIYASI

28.1. O'zgarmas tok mashinasining generator rejimidagi magnit maydoni

Salt ishlashidagi magnit maydon. Salt ishlayotgan O'T generatorida asosiy magnit maydon qo'zg'atish chulg'ami MYK tomonidan hosil qilinadi.

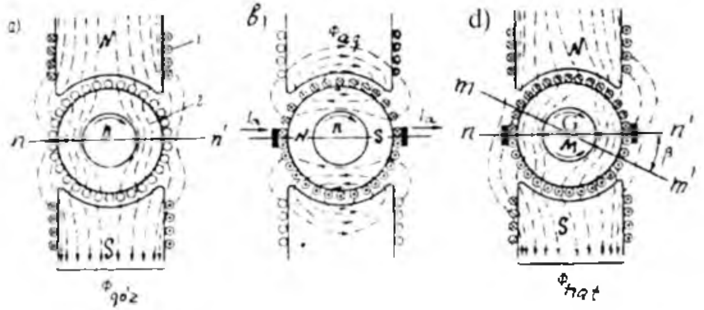
O'T mashinalarining magnit xarakteristikasi sinxron mashinalarnikiga o'xshagan bo'ladi. O'T mashinasining magnit zanjirini hisoblashga oid ma'lumot 31-bobda berilgan (31.4-bandga qarang).

Yuklama bilan ishlashidagi magnit maydon. Yakor reaksiyasi.

O'T mashinasi (generator)ga yuklama ulanganida yakor chulg'amidan tok o'tib MYK hosil bo'ladi. Yakor MYK ning mashina asosiy magnit maydoniga ta'siri ***yakor reaksiyasi*** deyiladi. Mashina magnit zanjiri to'yinishini hisobga olmasdan, qo'zg'atish chulg'ami ($F_{qo'z}$) va yakor chulg'ami MYK lari (F_{aq}) mashina magnit zanjirining havo oralig'i magnit qarshiligini yengishga sarflanadi deb hisoblanganda, tahlil uchun yuqorida ko'rsatilgan MYK lar o'rniga ularga mos bo'lgan magnit oqimlari ($\Phi_{qo'z}$ va Φ_{aq}) ni ishlatish mumkin bo'ladi.

Salt ishlashda asosiy magnit oqim ($\Phi_{qo'z}$) mashinaning bo'ylama o'qi bo'yicha yo'nalgan bo'ladi (28.1,*a*-rasm), yuklama bilan ishlaganda esa yakor chulg'ami MYK (F_{aq}) hosil qilgan magnit oqim Φ_{aq}, mashinaning cho'tkalari geometrik neytralga qo'yilganda (28.1,*b*-rasm), mashinaning qo'ndalang o'qi bo'yicha yo'naladi va shuning uchun uni ***ko'ndalang maydon*** ($\Phi_{aq} = \Phi_{a}$) deyiladi. Bu maydonning ta'siri (*yakor reaksiyasi*) tufayli natijaviy maydon B_{nat} bosh qutblar o'qlariga nisbatan taqsimlanishi simmetrik bo'lmaydi va har bitta qutbning bir chekkasiga siljigan bo'ladi (28.2,*d*-rasm). Bu holda fizik neytral *m—m'* (yakor aylanasida magnit induksiya nolga teng bo'lgan nuqtalarni birlashtiruvchi chiziq) mashinaning geometrik neytrali (*n—n'*) ga nisbatan birorta β burchakka siljiydi. O'T generatorlarida (28.2,*d*-rasmda "G") fizik neytral yakor aylanish yo'nalishi bo'yicha, motorlarda esa — teskari yo'nalishga siljiydi.

Magnit zanjiri to'yinmagan deb faraz qilingan O'T mashinasida qo'zg'atish chulg'ami yig'ilgan bo'lgani uchun, u hosil qilgan MYK ning taqsimlanishi to'g'ri to'rtburchak shaklida bo'lib, bitta qutb ostida u hosil qilgan magnit induksiyaning taqsimlanishi esa, egri chiziqli trapetsiya shaklida bo'ladi (28.2,*a*-rasm).



28.1-rasm. *O'zgarmas tok mashinasining magnit maydoni:* ***a)*** *qo'zg'atish chulg'amining maydoni* $F_{qo'z}$, *1 — qo'zg'atish chulg'ami, 2 — yakor;* ***b)*** *yakor chulg'amining maydoni* F_a; ***d)*** *mashinaning natijaviy magnit maydoni* F_{nat}.

Yakor chulg'amining MYK quyidagiga teng, ya'ni:

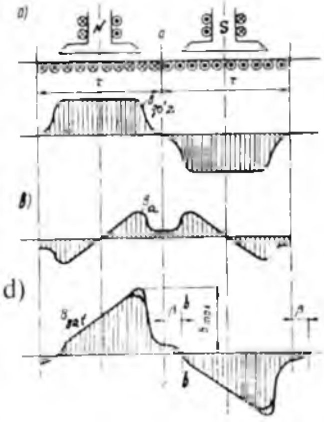
$$F_a = (\tau i_a) \cdot N / (\pi D_a) = \tau A. \qquad (28.1)$$

bunda: $N/(\pi D_a)$ — chulg'amdagi o'tkazgichlarning yakor aylanasi uzunlik birligiga to'g'ri keluvchi soni; $i_a = I_a / (2a)$ — yakor chulg'amining har bir o'tkazgichidan (demak, parallel shoxobchadan) o'tadigan tok; $A = i_a N / (\pi D_a)$ — yakorning chizig'iy yuklamasi, ya'ni yakor MYK ning yakor aylanasi uzunlik birligiga to'g'ri keladigan qismi.

MYK F_{aq} to'g'ri chiziqli o'zgaradi, ya'ni bosh qutb o'qida nolga teng bo'lib, cho'tka joylashgan ko'ndalang o'qda esa maksimal qiymatga ega bo'ladi. Uning qo'shni qutblar o'qlari orasidagi taqsimlanishi uchburchak shaklda bo'ladi. Shunday qilib, yuklama bilan ishlayotgan O'T mashinasida qo'zg'atish chulg'ami MYK $F_{qo'z(0)}$ va yakor chulg'ami MYK F_{aq} bo'ladi. Yakor magnit induksiyasining mashina havo oralig'ida taqsimlanishi qutb uchliklari chegarasidagina yakor MYK F_{aq} ning taqsimlanishi bilan mos tushadi. Qutblararo fazoda yakorning magnit oqimiga nisbatan qarshilikning ortib ketishi tufayli *magnit induksiya keskin kamayadi* (28.2,*b*-rasm).

Mashinaning magnit sistemasi to'yinmagan holda yakor reaksiyasi asosiy magnit oqimni buzadi xolos, lekin uning kattaligini o'zgartirmaydi. Qutbning yakor kirib kelayotgan tomonida va yakor o'zagining shu qutb ro'parasidagi tishli qatlami yakor MYK ning yo'nalishi asosiy qutblar MYK larining yo'nalishi bilan mos tushganligi tufayli ularning magnitlanishi oshadi; qutb tagidan yakor chiqib

28.2-rasm. *O'zgarmas tok mashinasining havo oralig'ida magnit induksiyaning taqsimlanishi:* ***a)*** *qo'zg'atish chulg'amining magnit induksiyasi ($B_{qo'z}$);* ***b)*** *yakor chulg'amining magnit induksiyasi (B_a);* ***d)*** *mashinaning natijaviy magnit induksiyasi (B_{nat})* →



ketayotgan tomonida va yakor o'zagining shu qutb ro'parasidagi tishli qatlami esa yuqoridagi MYK larning qarama-qarshi yo'nalganligidan magnitsizlanadi. Shu sababli natijaviy magnit oqim asosiy qutblarning o'qiga nisbatan ma'lum burchakka buriladi.

Mashina natijaviy maydonining buzilishi uning ish xossalariga yomon ta'sir etadi: 1) cho'tka kontakti ish sharoitini yomonlashtiradi, ya'ni kollektordan uchqun chiqishining kuchayishiga sabab bo'ladi; 2) mashina qutblarining ikkala maydon kuch chiziqlari bir xil yo'nalgan chekkalari ostidagi yakor chulg'amining seksiyalarida EYK larning oniy qiymatlari keskin oshadi. Natijada, qo'shni kollektor plastinalariaro kuchlanish U_k oshadi va katta qiymatli yuklamalarda uning qiymati standart tomonidan yo'l qo'yilganidan katta bo'lsa, plastinalar orasidagi mikanit (izolatsiya)ning elektr mustahkamligi bunga bardosh bera olmay, ular orasida elektr yoyi vujudga keladi. Bu hol kollektorning normal ishlashiga salbiy ta'sir ko'rsatib, uning xizmat muddatini keskin qisqartiradi.

Magnit sistemasi to'yingan O'T mashinasida yakor reaksiyasining salbiy ta'siri, ya'ni mashinani magnitsizlashi uning ish xossalarini yomonlashtiradi. Bu holda generatorlarda EYK, O'TM larida esa aylantiruvchi moment kamayadi.

Cho'tkalarning geometrik neytralga nisbatan siljishida yakor reaksiyasining mashina ishiga ta'siri *quyidagi sabablarga ko'ra* kuchayadi. Cho'tkalar siljiganda u bilan birga yakor MYK ning vektori ham siljiydi va bunda yakorning MYK F_a ko'ndalang tashkil etuvchisi ($F_{aq} = F_a \cos\beta$) dan tashqari, qutblar o'qi bo'yicha yo'nalgan bo'ylama tashkil etuvchisi

($F_{ad} = F_a \sin\beta$) ga ham ega bo'ladi. Generator rejimda ishlaganida cho'tkalar yakorning aylanish yo'nalishi tomonga siljisa, MYK ning bo'ylama tashkil etuvchisi F_{ad} qo'zg'atish chulg'ami MYK $F_{qo'z(o)}$ ga qarama-qarshi yo'nalib mashinaning asosiy magnit oqimini kuchsizlantiradi; cho'tkalar yakor aylanishiga teskari tomonga siljiganda esa, F_{ad} MYK $F_{qo'z(o)}$ ga mos yo'nalishi tufayli mashina magnitlanashini oshiradi va kollektorda uchqun chiqishiga sababchi bo'ladi.

Agar O'T mashinasi motor rejimda ishlaganida cho'tkalarning yakor aylanishi bo'yicha siljiganida MYK F_{ad} mashinani qo'shimcha magnitlab, ular teskari tomonga siljiganda esa magnitlanish darajasini kamaytiradi.

28.2. Yakor reaksiyasining salbiy ta'siri va uni bartaraf qilish

Kompensatsion chulg'am mashina yuklamasining me'yoriy qiymatlarida yakor MYK ning salbiy ta'sirini avtomatik ravishda bartaraf qilishni ta'minlaydi va natijada bosh qutblar ostidagi havo oralig'ida asosiy magnit maydon shakli deyarli buzilmaydi. Lekin qutblararo fazoda yakor MYK ning bir qismi kompensatsiyalanmay qoladi. Bu MYK ning cho'tkalar kontakti ishiga salbiy ta'sirini yo'qotish maqsadida mashina ko'ndalang o'qiga *qo'shimcha qutblar* o'rnatiladi va ularning chulg'ami yakor chulg'amiga uning cho'tkalari orqali ketma-ket ulanadi.

Kompensatsion chulg'am an'anaviy konstruksiyali mashinada qutb uchligida maxsus qilingan pazlarda joylashtiriladi, *noayon qutbli konstruksiyali 4P seriyali* O'T mashinalarida esa asosiy qutb chulg'ami pazlarida joylashtiriladi. Bu chulg'am mashina konstruksiyasini murakkablashtiradi, shuning uchun ular faqat og'ir sharoitda (yuklama keskin o'zgaradigan, oshirilgan yuklamali rejimda) ishlatiladigan o'rta va katta quvvatli (kuchlanishi $U_N > 440$ V, quvvati esa $P > 150$ kW bo'lgan) O'TM larida, masalan, elektr transportida, po'lat jo'valash dastgohlari (prokat stanlari)da qo'llaniladi.

Nazorat savollari:

1. O'zgarmas tok mashinasida yakor reaksiyasi nima?

2. Cho'tkalarning geometrik neytralga nisbatan siljishida yakor reaksiyasining mashina ishiga ta'siri qanday bo'ladi?

3. Yakor reaksiyasi mashinaga qanday salbiy ta'sir ko'rsatadi?

4. Kompensatsion chulg'am qanday vazifani bajaradi?

5. Yakor reaksiyasini qanday yo'llar bilan bartaraf qilish mumkin?

29-BOB. KOLLEKTORLI O'ZGARMAS TOK MASHINALARIDA KOMMUTATSIYA

29.1. Kommutatsiyaning fizik asoslari

Kollektorda uchqun chiqish sabablari. O'T mashinasining yakori aylanganida cho'tkalar bilan kollektor sirpanuvchi kontakt hosil qiladi. Agar cho'tka biror sababga ko'ra kollektorga butun yuzasi bilan tegmasa tokning zichligi nihoyatda ortib ketadi va bu kollektorda uchqun chiqishiga olib keladi. Kollektorda uchqun chiqishi *mexanik*, *potensial va kommutatsion sabablarga* ko'ra vujudga keladi.

Mexanik sabablarga cho'tkalarning kollektorga bosimining bo'shlig'i, kollektor sirtining silliqmasligi va kollektorning kirlanishi kiradi. Qo'shni kollektor plastinalari orasidagi kuchlanish normadan ortib ketganda kollektorda uchqun chiqishining *potensial sabablari* vujudga keladi. Potensial sababga ko'ra uchqun chiqishi, ayniqsa xavfli, chunki u kollektorda elektr yoyiga aylanib ketishi mumkin.

Yakor chulg'ami seksiyalarining bitta parallel shoxobchadan boshqasiga o'tishidagi fizik jarayonlar tufayli uchqun chiqishi *kommutatsion sabablarga* ko'ra vujudga keladi.

Seksiyalar bitta parallel shoxobchadan uzilib ikkinchisiga ulanganda ularda tokning o'zgarish jarayoni ***kommutatsiya*** deyiladi (29.1-rasm). Kommutatsiya sodir bo'ladigan seksiya kommutatsiyalanuvchi seksiya, kommutatsiya jarayoni sodir bo'lishiga ketgan vaqt esa ***kommutatsiya davri T*** deyiladi va u quyidagiga teng bo'ladi:

$$T = (b_{ch} / b_k) \cdot 60 / (Kn), \qquad (29.1)$$

bunda: K — kollektor plastinalar soni; n —aylanish chastotasi; b_{ch} — cho'tkaning kengligi; b_k — qo'shni kollektor platinasi o'rtalari orasidagi masofa.

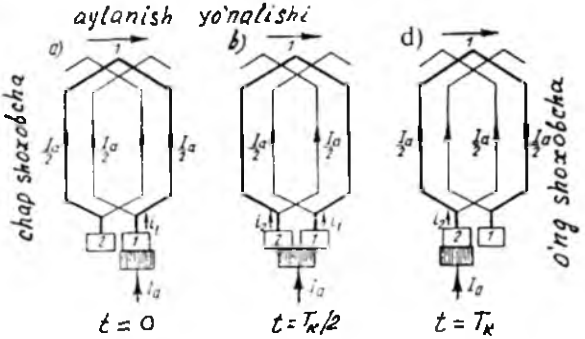
Kommutatsiya jarayonini tahlil qilishda cho'tkalar geometrik neytralda joylashgan, ularning kengligi $b_{ch} = b_k$ va kommutatsiyalanuvchi seksiyada butun kommutatsiya davri davomida EYK lar induksiyalanmaydi, deb faraz qilinsa, tokning o'zgarishi quyidagi tenglik orqali ifodalanadi:

$$I_1 / I_2 = r_{ch2} / r_{ch1}, \qquad (29.2)$$

bunda I_1, I_2 — tegishlicha, 1 va 2-plastinalardagi toklar.

Kommutatsiyalanuvchi seksiyadagi tok I quyidagi ayirmaga teng:

$$I = I_1 - I_2. \qquad (29.3)$$



29.1-rasm. *Kommutatsiyalanuvchi seksiyada tok yo'nalishining o'zgarishi.*

Kommutatsiya davrida kommutatsiyalanuvchi seksiyadagi tok (+I) dan (−I) gacha to'g'ri chiziqli o'zgaradi va salbiy ta'sir ko'rsatmaydi. Bunday kommutatsiyani ***to'g'ri chiziqli yoki ideal kommutatsiya deyiladi*** (29.2-rasm,1).

Ta'kidlash lozimki, O'T mashinasining real ish sharoitlarida kommutatsiya jarayoni ancha murakkab kechadi, chunki kommutatsiya davri juda qisqa, ya'ni ($10^{-4} \div 10^{-3}$s) ni tashkil qiladi. Masalan, K =100, b_{ch} = 2 va n = 1500 ayl/min bo'lgan mashinada kommutatsiya davri

T_k = 60 ·2/(100·1500) = 0, 0008 s.

Seksiyada tokning bunday tez o'zgarishidan katta qiymatli o'zinduksiya EYK e_L, qo'shni seksiyada esa o'zaro induksiya EYK e_M vujudga keladi:

$$e_L = -L_S\,(dI / dt)\ ;\ e_M = -M_S\,(dI / dt), \qquad (29.4)$$

bunda, L_S – seksiyaning induktivligi; I – seksiyadagi tok; M_S – bir vaqtda kommutatsiyalanuvchi seksiyalarning o'zaro induktivligi.

Ikkala EYK seksiyada natijaviy EYK e_{nat} ni hosil qiladi:

$$e_{nat} = e_L + e_M = e_r. \qquad (29.5)$$

Bu EYK Lens qoidasiga binoan kommutatsiyalanayotgan seksiyada tokning o'zgarishiga to'sqinlik qiladi va, shu sababli reaktiv EYK (e_r) deyiladi.

Bundan tashqari yakor reaksiyasi ta'siri (geometrik neytralda) magnit induksiya biror B_K qiymatga yetadi va bu induksiya ta'sirida ham kommutatsiyalanuvchi seksiyada tashqi maydon tufayli EYK hosil bo'ladi:

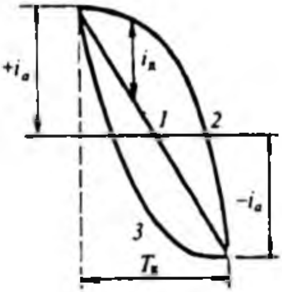
$$e_K = 2B_K \cdot l_\delta\, w_S \cdot v_a, \qquad (29.6)$$

bunda: l_δ – seksiya aktiv tomonining uzunligi;

v_a – seksiya harakatining tezligi;

w_s – seksiyadagi o'ramlar soni.

29.2-rasm. *O'zgarmas tok mashinasida tok kommutatsiyasi: 1 – ideal to'g'ri chiziqli kommutatsiya; 2 – sekinlashgan kommutatsiya; 3 – tezlashgan kommutatsiya.*



Shunday qilib, kommutatsiyalanuvchi seksiyada quyidagi umumiy EYK hosil bo'ladi:

$$\sum e = e_{nat} + e_K . \qquad (29.7)$$

Agar mashinada qo'shimcha qutblar bo'lmasa, e_{nat} va e_K EYK lar bir-biriga mos ravishda yo'naladi va ular ta'sirida kommutatsiyalanuvchi seksiyada qo'shimcha kommutatsiya toki I_k hosil qiladi. Bu tokning yo'nalishi shu seksiyadagi kommutatsiyaning boshlang'ich davridagi ish toki I ning yo'nalishi bilan mos bo'ladi, natijada kommutatsiyalanayotgan seksiyada *tok o'zgarishining kechikishiga* olib keladi.

Kommutatsiyalanuvchi tokni reaktiv EYK hosil qiladi, reaktiv EyuK hosil qilgan tok esa, Lens qoidasiga binoan, elektr zanjirida tokning o'zgarishiga to'sqinlik qiladi.

Shu sababli cho'tka 2 ta plastinani bir xil qoplaganda ham kommutatsiyalanuvchi seksiyadagi tok nolga teng bo'lmaydi. Kommutatsiyaning 2-yarim davridagina 0 ga tushadi natijada kommutatsiya ***egri chiziqli sekinlashgan*** bo'ladi (29.2-rasm, 2).

Mashina ortiqcha yuklama bilan ishlaganda cho'tkaning tok zichligi katta bo'lgan tomon qizib, kollektor bilan cho'tka orasida uchqun chiqa boshlaydi.

Kommutatsiyaning asosiy tenglamasi quyidagicha yoziladi:

$$e_r + e_K = I_1 r_1 - I_2 r_2 , \qquad (29.8)$$

bunda r_1 va r_2 – kommutatsiyalanuvchi seksiya qarshiligi r_s va tegishlicha cho'tka bilan kollektor plastina orasidagi o'tkinchi qarshilik (r_{ch1}, r_{ch2})lar yig'indisi.

Qo'shimcha kommutatsiya toki I_K cho'tkadan o'tib kommutatsiyalanuvchi seksiya orqali tutashadi. Natijada cho'tkaning plastina kirib kelayotgan tomonida tok zichligi ortib, kommutatsiya

davri oxirida ancha katta qiymatga erishadi. Mashina ortiqcha yuklama bilan ishlaganda cho'tkaning tok zichligi katta bo'lgan tomon qizib, kollektor bilan cho'tka orasidan uchqun chiqa boshlaydi. *Buning sababi* qisqa tutashgan seksiya zanjirining cho'tkadan uzilishidir.

Kommutatsiyalanuvchi seksiyaning qarshiligi ancha kichikligidan uni e'tiborga olmasa ham bo'ladi, u holda (29.8) tenglama quyidagicha yoziladi:

$$e_r + e_K = I_1 \cdot r_{ch.1} - I_2 \cdot r_{ch.2}. \quad (29.9)$$

Bu tenglama kommutatsiyaning asosiy tenglamasidir.

29.2. Kommutatsiyaning zararli ta'sirini kamaytirish usullari

O'T mashinalarida qoniqarsiz kommutatsiyaning asosiy sababi kommutatsiyaning qo'shimcha tokidir:

$$i_K = \sum e \;/\; \sum r_K, \quad (29.10)$$

bunda Σr_k – tok i_K ga bo'lgan elektr qarshiliklari yig'indisi.

Eng katta qarshilik, cho'tkaning qarshiligi bilan o'tish kontaktining qarshiligi (r_{ch}) dir.

$$i_K = \sum e / r_{ch}. \quad (29.11)$$

Bundan ko'rinishiga I_K ni kamaytirish uchun yoki r_{ch} ni oshirish, yoki Σe ni kamaytirish kerak ekan.

Qoniqarli kommutatsiya olish uchun ko'mir-grafitli yoki grafitli cho'tkalar ishlatish maqsadga muvofiqdir, chunki bularda o'tish qarshiligi eng katta bo'ladi. *Bunaqa cho'tkalar yuqori kuchlanishli kam tokli mashinalarda ishlatiladi.*

Pasaytirilgan kuchlanishli (30 V gacha bo'lgan) mashinalarda esa mis-grafitli yoki bronza-grafitli cho'tkalardan foydalaniladi.

Kommutatsiyalanuvchi seksiyadagi Σe ni

$$(\Sigma e = e_L + e_M + e_K = e_{rea} + E_K)$$

bir necha usullar bilan kamaytirish mumkin.

Kommutatsiya uchun cho'tka kengligining muhim ahamiyati bor. Cho'tka qancha keng bo'lsa, u bir vaqtning o'zida shunchalik ko'p kollektor plastinalarini yopadi. Buning natijasida o'zaro induksiya EYK E_M ko'payadi. Ingichka cho'tkalarni tanlashning noqulayligi bunda ularning mexanik mustahkamligi kam bo'ladi. Eni 2÷3 sm kollektor bo'linmasiga teng bo'lgan cho'tkalar ishlatish maqsadga muvofiqdir.

Reaktiv EYK (e_r)ning qiymatiga yakor chulg'amining turi sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Masalan, agar yakor chulg'ami qisqartirilgan qadamli ($u_1 < \tau$) qilinsa, bir vaqtda kommutatsiyalanuvchi seksiyalarning aktiv tomonlari turli pazlarda bo'lib, o'zaro induksiya EYK (e_M)ning kamayishiga yordam beradi.

Seksiyaning o'ramlar soni kamaytirilganda, ($L_s \equiv w_s^2$ bo'lganligidan), uning induktivligi kamayishi tufayli, o'zinduksiya e_L ham kamayadi. Lekin ko'rsatilgan usullar kommutatsiyani to'la yaxshilash uchun yetarli emas. *Shu sababli boshqa usullardan ham keng foydalaniladi.*

Masalan, ***kompensatsion chulg'am*** yakor reaksiyasi ta'sirini kamaytiradi. Kommutatsiya zonasida tashqi magnit maydoni yaratilib, bu maydon kommutatsiyalanuvchi seksiyalarda reaktiv EYK (e_r)ga kattaligi jihatidan teng va qarama-qarshi yo'nalgan EYK (e_K)ni hosil qiladi. Bu holda kommutatsiyalanuvchi seksiyada Σe nol bo'lib, ***kommutatsiya to'g'ri chiziqli*** bo'lib qoladi.

Kommutatsiya zonasida tashqi magnit induksiyasini hosil qilish uchun quvvati $P \approx 1 \div 150$ kW bo'lgan mashinalarda — qo'shimcha qutblar, 150 kW va undan katta quvvatli mashinalarda esa qo'shimcha ravishda kompensatsion chulg'am ishlatiladi.

Qo'shimcha qutblar va kompensatsion chulg'amlar yakor chulg'ami bilan ketma-ket ulanadi. Bu holda magnitlovchi kuch ($F_{qo'sh}$) mashina yuklamasining o'zgarishi bilan MYK F_a ga mutanosib ravishda o'zgaradi.

Agar qo'shimcha qutblar magnitlovchi kuchining qiymati ($F_{Qo'sh.Q} >$ F_A) qilinsa, $e_K > e_r$ bo'ladi va ish toki *I* ga qarama-qarshi yo'nalgan kommutatsiya toki I_K paydo bo'lishi tufayli kommutatsiya ***egri chiziqli tezlashgan*** bo'ladi (29.2-rasm, 3). Agar $e_K < e_r$ bo'lsa, kommutatsiya sekinlashib qoladi.

29.3. Kommutatsiyani tekshirish va sozlash

Kommutatsiya jarayoni juda murakkab hamda qo'shimcha qutblar chulg'ami o'ramlar sonini va ulardagi havo oralig'i o'lchamlarini to'g'ri ulash ancha qiyin bo'lgani uchun zavodda yangi tayyorlangan mashina kommutatsiyasini sozlash talab qilinadi.

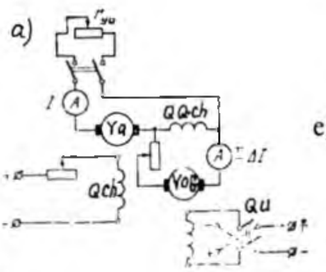
Kommutatsiyani sozlash qo'shimcha qutblar magnit zanjirining qarshiligini yoki shu qutbdagi qo'zg'atish chulg'amining magnitlovchi kuchini o'zgartitirish bilan bajariladi.

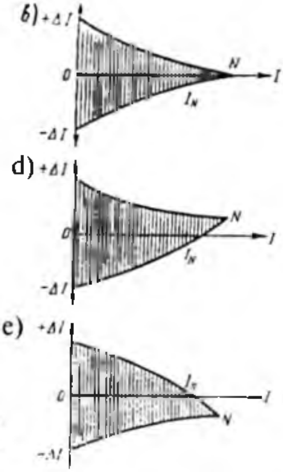
Kommutatsiyani tajriba yo'li bilan tahlil qilishda mashina qo'shimcha qutblarining chulg'ami yordamchi O'T generatori (YoG) dan qo'shimcha $\pm \Delta I$ tok bilan ta'minlanadi.

Bu masala quyidagicha amalga oshiriladi. Oldin mashina salt ishlatiladi ($I_a=0$), keyin qo'shimcha qutb chulg'amida ($+\Delta I$) tok kollektordan uchqun chiqquncha oshirib boriladi; ***bu tezlashtirilgan kommutatsiyaga*** mos bo'ladi. So'ngra sxemadagi qayta ulagich (QU) yordamida qo'shimcha tokning yo'nalishi o'zgartiriladi va ($-\Delta I$) ning qiymati kollektordan uchqun chiqquncha oshiriladi; *bu sekinlashgan kommutatsiyaga mos bo'ladi.*

So'ngra generatorga yuklama ulanadi, qo'shimcha qutb chulg'amiga oldin (+DI) qo'shimcha tok berib, so'ngra (-DI) tok beriladi, ularning qiymati kollektordan uchqun chiqquncha oshirilib boriladi.

Yuklamaning turli qiymatida shunday tajriba o'tkazib "qo'shimcha tok bilan ta'minlash" egri chiziqlari, ya'ni $+\Delta I = f(I)$ va $-\Delta I = f(I)$ bog'lanishga oid egri chiziqlari quriladi. Shu egri chiziqlar chegarasida, ya'ni $\pm\Delta I$ toklar zonasida kommutatsiya uchqunsiz bo'ladi. Bu zona qancha katta bo'lsa, mashinada kommutatsiya shuncha turg'un bo'ladi. Yuklama tokining ortishi bilan





29.3-rasm. *O'zgarmas tok mashinasining kommutatsiyasini tekshirishda qo'shimcha qutblar chulg'amini «qo'shimcha tok bilan ta'minlash» egri chiziqlari [+DI= f (I) va −D I = f (I)] ni tajribada olish sxemasi* ***(a)*** *(bunda: Qch - asosiy generatorning qo'zg'atish chulg'ami; YoG - yordamchi generator; QQch − qo'shimcha qo'zg'atish chulg'am, ya'ni yordamchi generator qo'zg'atish chulg'ami; QU - qayta ulagich hamda to'g'ri chiziqli* ***(b)****, sekinlashgan* ***(d)*** *va tezlashgan* ***(e)*** *kommutatsiyalarga oid «qo'shimcha tok bilan ta'minlash» egri chiziqlari.*

kommutatsiyaning turg'unligi kamayadi. Qo'shimcha qutbning magnitlovchi kuchi va havo oralig'i to'g'ri hisoblangan bo'lsa $+\Delta I = f(I)$ va $-\Delta I = f(I)$ egri chiziqlari yuklama o'qiga nisbatan simmetrik bo'ladi va N nuqtada kesishadi.

Agar qo'shimcha qutb (Qo'sh.Q)larning magnit oqimi ($\Phi_{Qo'sh.Q}$) kuchsiz bo'lsa (sekinlashgan kommutatsiyaga mos) N nuqta yuklama o'qidan yuqorida joylashadi, agar $\Phi_{Qo'sh.Q}$ kuchli bo'lsa (tezlashgan kommutatsiyaga mos) u pastda joylashadi. Ikkala holda ham mashinada kommutatsiya turg'un bo'lmaydi.

Qo'shimcha tok bilan ta'minlash egri chiziqlari yordamida kommutatsiya xarakterini aniqlab qo'shimcha qutblar rostlanadi: sekinlashgan kommutatsiyada $\Phi_{Qo'sh.Q}$ oqim kuchaytiriladi, tezlashgan kommutatsiyada esa $\Phi_{Qo'sh.Q}$ oqim kamaytiriladi. Agar magnit oqimini ancha ko'paytirish talab qilinsa, unda qo'shimcha qutb chulg'amining o'ramlar soni o'zgartiriladi.

Kommutatsiya jarayonida yuqori chastotali elektromagnit to'lqinlar hosil bo'ladi. Ular esa radiopriyomnik va televizion qurilmalar ishiga xalaqit beradi. Shovqinni kamaytirish uchun yakorga kondensatorlarni parallel ulash yo'li bilan yuqori chastotali kuchlanish va toklar filtrlanadi.

Nazorat savollari:

1. *Kollektorda uchqun chiqish sabablari nimalardan iborat?*
2. *Nima sababdan kommutatsiya sekinlashgan yoki tezlashgan bo'ladi?*
3. *Qo'shimcha qutblarning vazifasi nimalardan iborat?*
4. *Kommutatsiyani yaxshilash usullari nimalardan iborat?*

30-BOB. O'ZGARMAS TOK GENERATORLARINING XARAKTERISTIKALARI

30.1. Mustaqil qo'zg'atishli o'zgarmas tok generatorining xarakteristikalari

Bu turdagi generatorning qo'zg'atish chulg'amiga boshqa O'T manbayidan kuchlanish beriladi. Agar qo'zg'atish chulg'amiga ulangan kuchlanish $U_{qo'z}$ = const va uning qarshiligi ham $R_{qo'z}$ = const bo'lsa, generatorning har qanday ish rejimida ham bu chulg'amdagi tok $I_{qo'z}$ o'zgarmay qoladi.

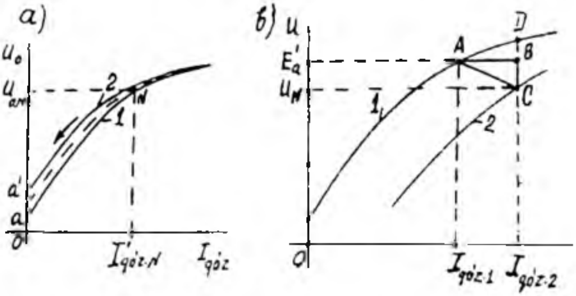
Salt ishlash va yuklanish xarakteristikalari. *Salt ishlash xarakteristikasi (SIX)* – generator yakorining aylanish chastotasi n = const va yakor toki I_j = 0 bo'lganda $U_0 \approx E_0 = f(I_{qo'z})$ bog'liqlikni ifodalovchi egri chiziqdir (30.1-rasm). Bu xarakteristikani tajribada olish vaqtida generator kuchlanishining qiymati $U_0 \approx (1{,}15 \div 1{,}2)U_N$ ga teng bo'lgunga qadar, qo'zg'atish toki $I_{qo'z}$ = 0 dan boshlab oshirib boriladi, so'ngra esa qo'zg'atish tokining qiymati 0 gacha kamaytiriladi.

Qo'zg'atish tokining qiymati oshirilib olinganda SIX ning o'suvchi shoxobchasiga ega bo'lamiz (30.1-rasm, 1). Bu egri chiziq koordinatalar boshi 0 dan boshlanmay, balki ordinatalar o'qidagi birorta "*a*" nuqtadan boshlanadi.

Bunga sabab shuki, $I_{qo'z}$ = 0 da mashina qutblari o'zagidagi qoldiq magnit oqimi (Φ_{qol}) kam miqdorda qoldiq EYK E_{qol} = 0*a* ni hosil qiladi. Qo'zg'atuvchi tok $I_{qo'z}$ ning qiymati kamaytirib olingan SIX ning kamayuvchi shoxobchasi uning o'suvchi shoxobchasiga nisbatan yuqorida joylashadi va $I_{qo'z}$ =0 bo'lganda qoldiq EYK ning qiymati E'_{qol} = 0*a'* ga teng bo'lib, oldingi E_{qol} dan biroz kattaroq bo'lishi, SIX ning o'suvchi shoxobchasini olganda Φ_{qol} ning qiymati boshdagi qiymati [Φ_{qol} = $(0{,}02 \div 0{,}03) \cdot \Phi_{0N}$]ga nisbatan biroz oshishi sabab bo'ladi (Φ_{0N} – mashina salt ishlash rejimida U_N hosil qilish uchun zarur bo'lgan magnit oqim.

Salt ishlash vaqtida mashinaning aylanish chastotasi n = const bo'lsa, $U_0 = E_0 \equiv \Phi$ bo'ladi. Demak, SIX – $U_0 = f(I_{qo'z})$ boshqa masshtabda mashinaning magnitlanish xarakteristikasi – $\Phi = f(I_{qo'z})$ ni ifodalar ekan.

SIX yordamida mashina magnit zanjiri xossalarini aniqlash mumkin. Haqiqatan ham, SIX ning "*a*" nuqtasi $I_{qo'z}$ = 0 bo'lganda, qoldiq magnit oqimining qiymatini ko'rsatadi. 30.1-rasmda ko'rsatilgan 1 va 2 shoxobchalar bilan chegaralangan maydon gisterezis hodisasi tufayli



30.1-rasm. *Mustaqil qo'zg'atishli o'zgarmas tok generatorining salt ishlash (a) va yuklanish (b) xarakteristikalari.*

hosil bo'lib, mashina magnit zanjiri po'lat qismlarining xossasini ko'rsatadi. Nihoyat, SIX da generatorning nominal kuchlanishi (U_N) uning egilgan qismiga (30.1-rasm, N nuqta) to'g'ri keladi. Bu nuqtaga qarab, mashina magnit zanjirining to'yinish holati to'g'risida xulosa yuritishimiz mumkin. *Quyidagi sabablarga ko'ra*, mashinani loyihalashda nominal kuchlanish U_N ni SIX ning egilgan qismiga to'g'ri keltirib amalga oshiriladi:

1) agar N nuqta to'g'ri chiziq qismiga to'g'ri kelsa, kuchlanishning qiymati noturg'un holatda bo'lib, qo'zg'atish toki salgina o'zgarsa ham kuchlanishning qiymati nisbatan katta o'zgaradi;

2) agar N nuqta SIX ning to'yingan qismida (egilgan qismidan o'ng tomonda) bo'lsa, kuchlanish qiymatini rostlash chegaralanib qoladi.

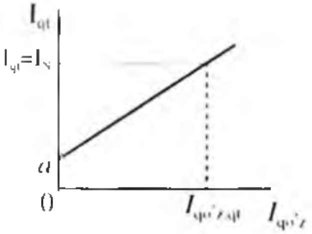
Kuchlanishning $U_0=(0,55\div0,6)U_N$ qiymatlarigacha to'g'ri chiziqli bo'lishi mashinaning magnit zanjiri to'yinmaganligidan dalolat beradi.

Yuklanish xarakteristikasi. Yakor toki I_a = const ($I_a > 0$) va yakorning aylanish chastotasi $n = n_N$ = const bo'lganda $U_a = f(I_{qo'z})$ bog'liqlikni ifodalovchi egri chiziq *yuklanish xarakteristikasi* deyiladi. Yuklanish xarakteristikasining *amaliy ahamiyati shundaki*, u yakor reaksiyasining magnitsizlovchi ta'sirini miqdoriy jihatdan aniqlashga hamda uning mashina magnit zanjiri to'yinishini tekshirishga imkon beradi. Agar bitta yuklanish xarakteristikasi olinadigan bo'lsa, ko'pincha yakor toki $I_a = I_N$ bo'lgan qiymat uchun olinadi.

Yuklanish va SIX larini solishtirish va ular yordamida xarakteristik uchburchak qurish uchun yuklanish xarakteristikasini SIXning kamayuvchi shoxobchasi (30.1,b-rasmda, 1) bilan bitta grafikda qurish qulay bo'ladi.

Yuklanish xarakteristikasi (2-egri chiziq) *quyidagi sabablarga ko'ra* SIX ga nisbatan pastda joylashadi: 1) yakor zanjiridagi qarshiliklarda kuchlanish pasayishi; 2) yakor reaksiyasining magnitsizlovchi ta'siri (buning natijasida mashinaning asosiy magnit oqimi va EYK kamayadi).

Agarda salt ishlash rejimda qo'zg'atish tokining bironta $I_{qo'z.2}$ qiymatida "D" nuqta bilan aniqlanadigan (30.1,*b*-rasm) kuchlanishga ega bo'lsak, yuklama bilan ishlaganda esa ($I_{qo'z.2}$ ning o'sha qiymatida) generatorning chiqish klemmalaridagi kuchlanishi kamayadi (30.1,*b*-rasmda "C" nuqta), ya'ni "DC" kesma bilan ifodalanadigan kuchlanish pasayishiga ega bo'lamiz. Bu kesmaning "BC" qismi yakor zanjiri va cho'tkalardagi kuchlanish pasayishini, "DB" kesma esa yakor reaksiyasining magnitsizlovchi ta'siri tufayli kuch-lanish pasayuvini ifodalaydi. Yakor toki I_a = const bo'lsa, CB kuchlanish pasayuvi ham o'zgarmas bo'ladi. Yakor reaksiyasining magnitsizlovchi ta'siri esa $I_{qo'z}$ ning oshishi bilan o'zgaruvchan bo'ladi, chunki bu holda magnit zanjirining to'yinish darajasi o'zgaradi.



30.2-rasm. *Mustaqil qo'zg'atishli generatorning qisqa tutashuv xarakteristikasi.*

EYK E_a ning bir xil qiymatini olish uchun salt ishlash rejimda $I_{qo'z.1}$ qo'zg'atish toki talab qilinsa, yuklama bilan ishlaganda esa, qiymati $I_{qo'z.2} > I_{qo'z.1}$ bo'lgan qo'zg'atish toki kerak bo'ladi. Bu toklarning farqi yakor chulg'amidagi EYK E_a ni "DB" qiymatga kamaytiruvchi yakor reaksiyasining magnitsizlovchi ta'sirini kompensatsiyalashga sarflanadi.

SIX va xarakteristik uchburchak yordamida elektromagnit qo'zg'atishli O'T generatorlarining normal ish jarayonidagi tashqi va rostlash xarakteristikalarini grafik usulda aniqlash mumkin. 30.d-rasmdagi hosil bo'lgan "ABC" uchburchakni *xarakteristik (yoki reaktiv) uchburchak* deyiladi.

Qisqa tutashuv xarakteristikasi (QTX). Bu xarakteristika — yakor

chulg'ami qisqa tutashtirilib (demak, $U_a = 0$), aylanish chastotasini $n = n_N$ =const bo'lgandagi $I_a = f(I_{qo'z})$ bog'liqlikni ifodalaydi.

QTX ni tajribada qo'zg'atish chulg'ami hosil qiladigan magnit oqimining yo'nalishi Φ_{qol} yo'nalishi bilan mos tushgan hol uchun oladilar. Bu holda qo'zg'atish tokini 0 dan boshlab oshirganda qisqa tutashuv (QT) toki I_{qt} bironta *a* nuqtadan *to'g'ri chiziqli* ko'rinishda oshadi (30.2-rasm). $I_{qo'z} = 0$ bo'lganda ham yakor zanjiridan $I_{qt} = 0a$ tok o'tadi. Bu tok Φ_{qol} yakor chulg'amida vujudga keltirgan kichik qiymatdagi EYK E_{qol} hisobiga hosil bo'ladi. Odatda yakor tokining yo'l qo'yilgan qiymatlarida QTX deyarli to'g'ri chiziqli bo'ladi.

Agar cho'tka bilan kollektor orasidagi o'zgaruvchan kontakt qarshiligini e'tiborga olmasak (bunda $R_a \approx$ const) QT toki I_{qt} EYK E_a ga, magnit sistema to'yinmaganligi uchun bu tok (I_{qt}) qo'zg'atish tokiga to'g'ri mutanosib ravishda o'zgarar ekan ($I_{qt} \equiv I_{qo'z}$).

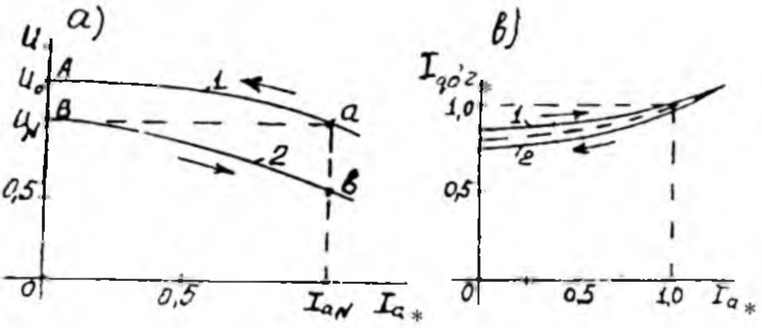
Tashqi va rostlash xarakteristikalari. Generatorni ishlatishdagi asosiy ish jarayonni belgilovchi xarakteristika – *tashqi* xarakteristikadir. Odatda, generatorlarga nisbatan qo'yiladigan talab (payvandlash generatorlaridan tashqari) umumiy bo'lib, ularning qo'zg'atish toki $I_{qo'z}$ = const bo'lganda, yuklama tokining qiymati 0 dan yo'l qo'yilgan qiymatgacha o'zgarganda, generatorlarning chiqish klemmalaridagi kuchlanishi nominal qiymatidan mumkin qadar kam o'zgarishi amaliyot uchun muhimdir.

Tashqi xarakteristika – qo'zg'atish toki $I_{qo'zN}$ = const va yakorning aylanish chastotasi n_N = const bo'lganda $U_a = f(I_a)$ bog'liqlikni ifodalaydi. Bu xarakteristikani ahamiyatga ega bo'lgan ikkita hol uchun tahlil qilish foydalidir:

1) salt ishlash rejimda (I_a=0) yakor chulg'amida hosil bo'lgan EYK ning qiymati $E_0 = U_N$ ga to'g'ri kelgan qo'zg'atish toki $I_{qo'zN}$ = const bo'lganda yuklama tokini oshirib olish (30.3,*a*-rasm, 2);

2) yakor chulg'amining toki $I_a = I_N$ va kuchlanishi U_N bo'lganda qo'zg'atish tokini $I_{qo'zN}$ = const qilib, yuklama tokini kamaytirib olish (30.3,*a*- rasm, 1).

Tashqi xarakteristikani tajribada yuklama tokini $I_a = 0$ dan $I_a = I_N$ gacha oshirib olinganda, generator chiqish klemmalaridagi kuchlanishi, yakor reaksiyasi magnitsizlovchi ta'sirining va yakor zanjiridagi qarshiliklarda kuchlanish pasayishi tufayli biroz kamayadi (2-egri chiziq). Tashqi xarakteristika egri chizig'ining shakliga yuklama toki tufayli magnit zanjiri to'yinish darajasining o'zgarishi ham sabab bo'ladi.



30.3-rasm. *Mustaqil qo'zg'atishli o'zgarmas tok generatorining tashqi (a) va rostlash (b) xarakteristikalari.*

Ma'lumki, generatorning kuchlanishi (U_a), natijaviy magnit oqimiga bog'liq ravishda o'zgaradigan E_a, yakor zanjiridagi (I_aR_a) hamda cho'tkalarda bo'ladigan (ΔU_{ch}) kuchlanish pasayishlari bilan aniqlanadi:

$$U_a = E_a - I_aR_a - \Delta U_{ch}. \qquad (30.1)$$

Yuklama toki oshirilganda yakor reaksiyasining mashina asosiy maydoniga bo'lgan magnitsizlovchi ta'siri ortadi. Qo'zg'atish toki $I_{qo'z}$ = const bo'lganligidan, generatorning natijaviy magnit oqimi, demak, EYK E_a ham biroz kamayadi.

Tashqi xarakteristikani tajribada olishda *davlat standarti tavsiyasi qo'yidagicha:* yakorning aylanish chastotasi n= n_N va qo'zg'atish tokini $I_{qo'z\ N}$ =const holda saqlab, yuklama toki I_a ni nominal qiymatidan 0 gacha kamaytirib olish lozim.

Yuklama toki kamaya borgan sari, ko'ndalang yakor reaksiyasi ta'sirining susayishi va yakor zanjirida kuchlanish pasayishi I_aR_a ning kamayishi tufayli, yakor chulg'ami chiqish klemmalaridagi kuchlanish tobora oshadi (30.3,*a*-rasm, 1).

Tashqi xarakteristika yuklamani oshirib olinganda kuchlanish pasayuvi quyidagicha aniqlanadi:

$$\Delta U_{\%} = 100\ (U_N - U_a)\ /\ U_N\ , \qquad (30.2)$$

bunda U_N – yakor toki I_a = I_N bo'lganda generator chiqish klemmalaridagi nominal kuchlanish.

Kompensatsion chulg'ami bo'lmagan o'rta quvvatli mashinalarda kuchlanishning oshishi, odatda (5÷10) foizni tashkil qiladi.

Rostlash xarakteristikasi. Yakorning aylanish chastotasi n_N= const

va yakorning kuchlanishi U_N = const bo'lganida $I_{qo'z} = f(I_a)$ bog'liqlik — generatorning *rostlash* xarakteristikasini ifodalaydi.

Bu xarakteristikani, *yuklama tokini kamaytirib olingan hol uchun ko'rib chiqamiz.* (30.1) formulaga asosan, agar qo'zg'atish toki $I_{qo'z}$ ning qiymatini o'zgartirmay qoldirilsa, yuklama toki I_a ning kamayishi tufayli yakor reaksiyasining kuchsizlanishi va $I_a R_a$ ning kamayishi sababli, generatorning chiqish klemmalaridagi kuchlanish miqdori oshadi. Lekin, shartga ko'ra, $U_a = U_N$ = const bo'lishi kerak, shu maqsadda, rostlash xarakteristikasini olayotgan paytda qo'zg'atish toki $I_{qo'z}$ ni kamaytirib borish lozim bo'ladi (30.3,*b*-rasm).

Tajribada rostlash xarakteristikasining ikkita shoxobchasini, ya'ni yuklama toki I_a ni $0 \leq I_a \leq I_N$ oraliqda tobora oshirib (1-shoxobcha), so'ngra, tok I_a ni I_N qiymatidan asta-sekin 0 gacha kamaytirib (2-shoxobcha) olinadi. Bunda 1-shoxobcha ikkinchiga nisbatan yuqorida joylashadi. *Bunga sabab:* 1-shoxobchani olishda yuklama toki I_a ning qiymati I_N gacha oshganda bir vaqtning o'zida qo'zg'atish toki $I_{qo'z}$ ham oshiriladi. Bu esa, magnit zanjirining po'lat qismlarida Φ_{qol} ning nisbatan ko'payishiga olib keladi, natijada xarakteristikaning 2-shoxobchasini olganda $U_a = U_N$ = const bo'lishi uchun kamroq qo'zg'atish magnit oqimi (demak, kamroq qo'zg'atish toki) talab qilinadi. Bu ikkala shoxobchaning o'rtasidan o'tkazilgan punktir chiziq rostlash xarakteristikasi uchun qabul qilinadi (30.3,*b*-rasm).

Shuni ta'kidlash kerakki, rostlash xarakteristikasi, yuklama tokini o'zgartirganda generatorning kuchlanishini o'zgartirmay saqlab turish maqsadida, *qo'zg'atish tokini rostlash qonuniyatini* ifodalaydi. Masalan, yuklama tokini oshirganda generator kuchlanishining nominal qiymati U_N ga nisbatan kamayishini bartaraf etish, ya'ni kuchlanishni U_N= const qilib saqlash uchun qo'zg'atish toki $I_{qo'z}$ ni biroz oshirish kerak bo'ladi.

30.2. Parallel qo'zg'atishli o'zgarmas tok generatorining o'z-o'zini qo'zg'atishi va normal rejimdagi xarakteristikalari

Parallel qo'zg'atishli generatorlarning o'z-o'zini qo'zg'atishi (demak, qo'zg'atish uchun alohida O'T manbayi talab qilinmasligi) hamda normal yuklamada turg'un kuchlanish berishi sababli ular amalda keng qo'llaniladi.

Salt ishlash xarakteristikasi. Bunday generatorning SIX, mustaqil qo'zg'atishli O'T generatorinikiga o'xshagan bo'lib, yuklama toki I_a=0

va yakorning aylanish chastotasi n_N = const bo'lganda. $U_0 = f(I_{qo'z})$ bog'liqlikni ifodalaydi. Parallel qo'zg'atishli generatorning, salt ishlashida $I_a = I_{qo'z}$ bo'ladi (mustaqil qo'zg'atishlida esa yakor toki I_a = 0).

Qo'zg'atish toki $I_{qo'z}$, odatda, yakor zanjiri nominal toki I_{aN} ning (2÷4) foizini tashkil qilgani uchun. O'T generatori kuchlanishi muvozanat tenglamasi (30.1)da kuchlanish pasayishlari ($I_a R_a$ va ΔU_{ch}) kichikligidan ularni e'tiborga olmasdan, $U_0 \approx E_0$ deb hisoblasa bo'ladi.

Parallel qo'zg'atishli generatorning SIX ni tajriba yo'li bilan, kuchlanish U_0 va qo'zg'atish toki $I_{qo'z}$ larning faqat musbat qiymatlari uchun aniqlab olish mumkin, chunki qo'zg'atish tokining ishorasini o'zgartirganda, generatorning kuchlanishi U_0 o'zining 0 qiymati orqali o'tadi va, buning natijasida, mashina magnit zanjirining po'lat qismlaridagi qoldiq magnit oqimi yo'qoladi va mashina o'z-o'zini qayta qo'zg'atish imkoniyatidan mahrum bo'ladi.

Parallel qo'zg'atishli generatorning o'z-o'zini qo'zg'atish jarayoni.

Zavod sinovidan o'tgan har qanday O'T mashinasi magnit zanjirining po'lat qismlarida qoldiq magnit oqimi F_{qol} mavjud bo'ladi. Agar shunday magnit oqimi mashinada bo'lmasa, uni hosil qilish uchun tashqi O'T manbayini qo'zg'atish chulg'amiga ulab qisqa muddatli tok o'tkazish kerak bo'ladi.

Agar yakor birlamchi motor yordamida aylantirilsa, uning chulg'amida Φ_{qol} ta'sirida, dastlab kam diqdorda EYK (E_{qol}) hosil bo'lib, uning ta'sirida «yakor chulg'ami – qo'zg'atish chulg'ami» yopiq zanjirida kam miqdorda tok vujudga keladi. Bu tok, o'z navbatida, qo'zg'atish chulg'amida MYK $F_{qo'z}$ ni hosil qilib, uning ta'sirida qo'shimcha magnit oqimi $\Phi_{qo'z}$ hosil bo'ladi. Mashina o'z-o'zini qo'zg'atish uchun bu oqimning F_{qol} ga nisbatan *yo'nalishi hal qiluvchi ahamiyatga ega bo'ladi*. Agar bu oqimlarning yo'nalishi qarama-qarshi bo'lsa, mashinaning magnit zanjiri magnitsizlanadi va o'z-o'zini qo'zg'atish jarayoni boshlanishga imkon bo'lmaydi. Bu oqimlar mos yo'nalgandagina qo'zg'atish oqimining natijaviy qiymati osha boradi. Bu esa yakor chulg'amidagi EYK ning ko'payishiga, demak, qo'zg'atish toki $I_{qo'z}$ va oqimi $\Phi_{qo'z}$ larning oshishiga hamda yakor chulg'ami EYK ning navbatdagi oshishiga olib keladi va hokazo.

Agar $r_{qo'z}$ = const bo'lsa, qo'zg'atish zanjiridagi kuchlanish pasayishi ($I_{qo'z} \cdot r_{qo'z}$) qo'zg'atish tokiga to'g'ri mutanosib ravishda o'zgaradi (30.4-rasm, 1). Bu to'g'ri chiziq absissalar o'qi bilan α burchak hosil qilib

o'tadi. Bu burchakni uning tangensi orqali qo'yidagicha aniqlanadi:

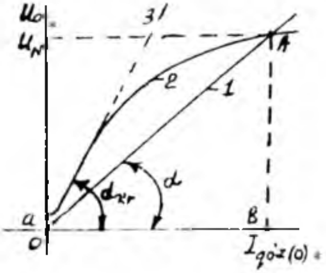
$$\text{tg}\,\alpha = (m_u / m_I)\cdot AV / OV =$$

$$(m_u/m_I)\cdot(I_{qo'z}\cdot\Sigma r_{qo'z}) / I_{qo'z} \equiv \Sigma r_{qo'z}. \qquad (30.3)$$

Demak, mashina salt ishlashida o'z-o'zini qo'zg'atish jarayonining tugagan nuqtasi "A" va koordinatalar boshi 0 orqali o'tgan to'g'ri chiziqning absissalar o'qiga nisbatan qiyalik burchagi α qo'zg'atish zanjirining qarshiligi $\Sigma r_{qo'z}$ ga to'g'ri mutanosibda bo'lar ekan. $\Sigma r_{qo'z}$ ning ortishi bilan 30.4-rasmdagi A nuqta SIX egri chizig'i bo'yicha 0 nuqta tomon siljiydi. $\Sigma r_{qo'z}$ ning 1-to'g'ri chiziqqa to'g'ri kelgan qiymatidan katta bo'lgan qandaydir qiymatda to'g'ri chiziq SIX egri chizig'ining boshlang'ich qismiga urinma (30.4-rasm, 3) bo'ladi.

Qarshilikning ana shu qiymatiga *kritik qarshilik* ($\Sigma r_{qo'z\,kr}$) deyiladi. Bunda generator o'z-o'zini qo'zg'ata olmaydi.

Agar qo'zg'atish zanjiri parametrlari $\Sigma r_{qo'z} < \Sigma r_{qo'z\,kr}$ bo'ladigan qilib



30.4-rasm. *Yakorining aylanish chastotasi n const bo'lganda, parallel qo'zg'atishli generatorning o'z-o'zini qo'zg'atish jarayonini tushuntirishga oid chizma.*

tanlangan bo'lsa, unda "A" nuqtada o'z-o'zini qo'zg'atish jarayonining turg'unligi ta'minlanadi. O'z-o'zini qo'zg'atish jarayonining "A" nuqta bilan cheklanishi magnit zanjirining to'yinishi hodisasi tufayli bo'ladi.

Demak, parallel qo'zg'atishli O'T *generatori o'z-o'zini qo'zg'atishi uchun quyidagi shartlar bajarilishi kerak ekan*: 1) qoldiq magnit oqimi F_{qol} ning mavjud bo'lishi; 2) qo'shimcha magnit oqimi $F_{qo'sh}$ qoldiq magnit oqimi F_{qol} bilan bir xil yo'nalishda bo'lishi; 3) qo'zg'atish zanjirining qarshiligi $\Sigma r_{qo'z}$ kritik qarshilik $\Sigma r_{qo'z\,kr}$ dan kichik bo'lishi ($\Sigma r_{qo'z} < \Sigma r_{qo'z\,kr}$).

Bu shartlar $n = \text{const}$ ($n > n_{kr}$) bo'lgandagi parallel qo'zg'atishli O'T generatori *o'z-o'zini qo'zg'atishining asosiy shartlari hisoblanadi.*

Yuklanish xarakteristikasi. Uning tajribada olinishi va o'zgarish xarakteri, xuddi mustaqil qo'zg'atishli generatorlarniki kabi bo'ladi (30.1-rasmga qarang).

Rostlash xarakteristikasi. Parallel qo'zg'atishli O'T generatorining rostlash xarakteristikasi, xuddi mustaqil qo'zg'atishli generatorniki kabi (30.3.*b*-rasmga qarang). $U_a = U_N$ = const va $n = n_N$ = const bo'lganda, $I_{qo'z} = f(I_a)$ bog'liqlikdir. Bu xarakteristika, yuklama tokining har xil qiymatlarida yakor zanjirining kuchlanishini $U_a = U_N$ = sonst qilib saqlab turish uchun qo'zg'atish toki $I_{qo'z}$ ning o'zgarishi qanday tarzda bo'lishini ko'rsatadi. Agar yakor toki I_a va yuklama toki I_{yu} larning ozgina farqini e'tiborga olmasak, parallel qo'zg'atishli generatorning rostlash xarakteristikasi mustaqil qo'zg'atishli generatornikidan farq qilmaydi (30.3.*b*-rasm).

Tashqi xarakteristikasi. Bu xarakteristika $\Sigma r_{qo'z} = r_{qo'z} + r_{sh.r}$ = const va $n = n_N$ = const bo'lganda, $U_a = f(I)$ bog'liqlik ko'rinishda bo'ladi.

Parallel qo'zg'atishli generatorning bu xarakteristikasi xuddi mustaqil qo'zg'atishli generatorning tashqi xarakteristikasi kabi, qo'zg'atish sistemasidagi rostlovchi reostatning dastlabki olingan nuqtadagi ($U_a = U_N$) holatini o'zgartirmasdan yuklama tokining o'zgarishi yakor zanjirining chiqishidagi kuchlanishi U_a ga qanday ta'sir qilishini ko'rsatadi.

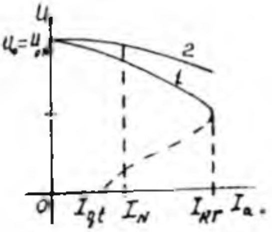
Shuni ta'kidlash kerakki, mustaqil qo'zg'atishli generatorda qo'zg'atish toki o'zgarmas bo'lsa, parallel qo'zg'atishli generatorlarda esa, $U_{qo'z} = U_a$ bo'lganligidan qo'zg'atish toki $I_{qo'z}$ o'zgaradi, ya'ni

$$I_{qo'z} = U_{qo'z} / \Sigma r_{qo'z} \neq \text{const} \qquad (30.6)$$

bo'ladi. Demak, qo'zg'atish zanjiridagi qarshilik $\Sigma r_{qo'z}$ = const bo'lsa, qo'zg'atish toki $I_{qo'z}$ generator yakorining kuchlanishiga mutanosib ravishda o'zgarar ekan.

Yuklama tokini oshirib olingan tashqi xarakteristikalarini taqqoslasak (30.5-rasm), parallel qo'zg'atishlida bu xarakteristika mustaqil qo'zg'atishlinikiga nisbatan pastroqda joylashganini ko'ramiz. *Bu quyidagicha tushuntiriladi.*

Agar mustaqil qo'zg'atishli generatorda yuklama tokining oshishi bilan kuchlanishning tushishiga: 1) yakor reaksiyasining magnitsizlovchi ta'siri va 2) yakor zanjiridagi kuchlanishning pasayishi sabab bo'lsa,



30.5-rasm. *Parallel qo'zg'atishli o'zgarmas tok generatorining tashqi xarakteristikasi (1);*
2 – mustaqil qo'zg'atishli generatorning tashqi xarakteristikasi (taqqoslash uchun keltirilgan).

parallel qo'zg'atishli generatorda bunga 3-sabab qo'shiladi, ya'ni yuqorida ko'rsatilgan 2 ta sababga ko'ra, yakor zanjiridagi (demak, qo'zg'atish zanjiridagi) kuchlanishning kamayishi (chunki $U_{qo'z} = U_a$) tufayli qo'zg'atish tokining kamayishi ta'sir ko'rsatadi. Demak, shu 3-sababga ko'ra, parallel va mustaqil qo'zg'atishli generatorlarning tashqi xarakteristikalari bir-biri bilan farq qilar ekan.

Agar tashqi xarakteristikani tajribada olish jarayonida yuklama qarshiligi R_{yu} ni 0 gacha kamaytirishni davom qildirsak (30.5-rasmda 2-punktir chiziq), yakor toki I_a haddan tashqari oshib ketadi, chunki bunda $U_a = 0$ bo'lib, qisqa tutashuv rejimiga ega bo'lamiz. Yakor tokining yo'l qo'yilgan qiymatidan oshib ketishi yakor chulg'amini ishdan chiqaradi.

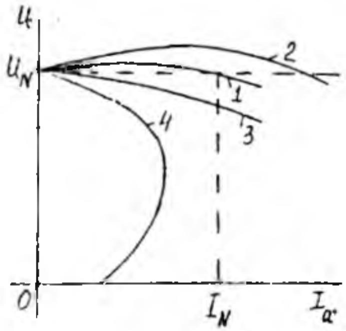
Parallel qo'zg'atishli generatorning tashqi xarakteristikasini olishda R_{yu} ni 0 gacha kamaytirsak yuklama toki $I_{yu} = I_a$ o'zining kritik $I_{kr}=(2\div2{,}5)I_N$ qiymatigacha oshib, keyin esa kamaya boradi (30.5-rasm, 1'-punktir egri chiziq). *Buni quyidagicha tushuntirish mumkin.* Ma'lumki, R_{yu} qarshilikning kamayishi yuklama tokining oshishiga olib kelishi kerak, ammo yuqorida ko'rsatilgan 3 ta sababga ko'ra generatorning chiqish klemmalaridagi kuchlanishning kamayishi, teskari yo'nalishda ta'sir qiladi. Yuklama tokining qiymati yuklama qarshiligi va generator kuchlanishining qiymatlariga bog'liq ravishda o'zgaradi.

Xulosa qilib shuni ta'kidlash mumkinki, mustaqil va parallel qo'zg'atishli generatorlarning xarakteristikalari va xossalari yuklama tokining $I_a = 0$ dan $I_a = I_N$ gacha o'zgarishida bir-biridan kam farq qiladi.

30.3. Aralash qo'zg'atishli o'zgarmas tok generatorining xarakteristikalari

Dastlabki ma'lumotlar. Bu turdagi generatorning ikkita qo'zg'atish chulg'ami bo'lib, ulardan bittasi yakor chulg'amiga parallel qilib, ikkinchisi esa unga ketma-ket qilib ulanadi.

Ketma-ket qo'zg'atish chulg'ami faqat aralash qo'zg'atishli generatorlarda yaxshi samara beradi. Parallel (F_{Sh}) va ketma-ket (F_S) qo'zg'atish chulg'amlari hosil qilgan MYK larning birgalikdagi ta'siridan umumiy qo'zg'atish oqimi $F_{qo'z}$ vujudga keltiriladi. Ko'pincha qo'zg'atish chulg'amlari, ular hosil qilgan magnit oqimlari bir xil yo'naladigan qilib ulanadilar. Ketma-ket qo'zg'atish chulg'ami yakor reaksiyasi MYK ni va yakor zanjirida kuchlanish pasayuvi (I_aR_a) ni kompensatsiyalaydi. Shu tarzda generator klemmalaridagi kuchlanishni avtomatik ravishda rostlashga erishiladi.



30.6-rasm. *Aralash qo'zg'atishli generatorning tashqi xarakteristikalari (1; 2; 4); 3 – parallel qo'zg'atishli uchun (taqqoslash uchun keltirilgan).*

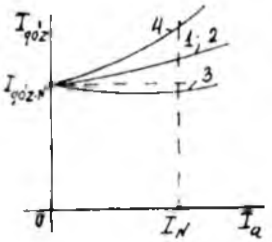
Aralash qo'zg'atishli generatorlar magnit zanjirining to'yinish darajasi kam bo'lgan mashinalar turiga kiradi.

Tashqi xarakteristikasi. Bu xarakteristika, parallel qo'zg'atish zanjiridagi qarshilik $\Sigma r_{qo'z}$=const va n= n_N= const bo'lganda U_a =f(I_a) bog'liqlikni ifodalaydi. Bu xarakteristika, normal ishlatish xarakteristikasi bo'lganligidan uning tahlili katta ahamiyatga egadir.

Ketma-ket qo'zg'atish chulg'amining o'ramlar soni shunday tanlanadiki, u hosil qilgan MYK yakor reaksiyasini va yakor zanjirida kuchlanish pasayishini, I_a = I_N qiymatda bartaraf qilsin (30.6-rasm). Ammo, ko'pincha generator klemmalaridagi kuchlanishni bir xil qilish talab qilinmay (30.6-rasm,1), balki elektr energiya iste'molchilaridagi kuchlanishning qiymati U_N=const bo'lishi talab qilinadi. Buning uchun, qo'shimcha ravishda liniya simlaridagi kuchlanish pasayishini ham bartaraf qilish kerak bo'ladi. Buning uchun ketma-ket qo'zg'atishli chulg'amning o'ramlari *w* oshiriladi (30.6-rasm, 2).

Bu rasmda har xil qo'zg'atishli (ketma-ket qo'zg'atishlidan boshqa) o'zgarmas tok generatorlarining yuklamasi oshirib olingan tashqi xarakteristikalari taqqoslangan. Parallel va ketma-ket qo'zg'atish chulg'amlari qarama-qarshi ulangan hol (30.6-rasm, 4) payvandlash generatorlarida ishlatiladi.

Rostlash xarakteristikasi. Bu xarakteristika, U_a =U_N = const va n = n_N = const bo'lgandagi $I_{qo'z}$ = f (I_a) bog'liqlikni ifodalaydi. Bu xarakteristika aralash qo'zg'atishli generatorning tashqi xarakteristikasi ko'rinishiga bog'liq bo'ladi. Generatorning ketma-ket qo'zg'atishli chulg'amining o'ramlar sonini ko'proq qilib, ya'ni yuklama toki o'sishi bilan yakor zanjirining chiqish klemmalaridagi kuchlanishi oshadigan qilib tayyorlansa, unda bu generatorning rostlash xarakteristikasi 30.8-



***30.7-rasm**. Qo'zg'atish cho'lg'amlari har xil ulanish sxemalariga xos bo'lgan aralash qo'zg'atishli generatorlarning rostlash xarakteristikalari (**1, 2, 3, 4** – belgilashlar 24.6-rasmdagilar bilan bir xil).*

rasmdagi 3-egri chiziq ko'rinishida bo'ladi.

Bu xarakteristikalar, yuklama toki o'zgarishi bilan, generatorning kuchlanishi $U = U_N$ = const bo'lishi uchun, *parallel qo'zg'atish chulg'amidagi tokni qanday o'zgartirish kerakligini ko'rsatadi.*

Qo'zg'atish chulg'amlari to'g'ri yoki teskari ulanganligini yuklanish usuli bilan tekshirish mumkin. Buning uchun salt ishlashda yakorning aylanish chastotasi $n = n_N$ bo'lganda generatorni nominal kuchlanishga qadar qo'zg'atiladi va, so'ngra, uning yuklama tokini oshira boshlaymiz. Agar bunda generator kuchlanishi ozroq ortsa, bu ikki qo'zg'atish chulg'amlari to'g'ri ulangan bo'lib, agarda bu chulg'amlar teskari ulanganda kuchlanishning kamayishi sezilarli bo'ladi.

Shuni eslatib o'tish lozimki, faqat parallel qo'zg'atish chulg'amidagi tokning yo'nalishini o'zgartirib, qo'zg'atish chulg'amlarning o'zaro ulanishlarini o'zgartirib bo'lmaydi, bunga sabab, parallel qo'zg'atish chulg'amidagi tok yo'nalishining o'zgarishi yakor chulg'amidagi EYK ning yo'nalishini o'zgartiradi, bu esa, o'z navbatida, yakor tokining va ketma-ket qo'zg'atish chulg'amidagi tokning ham yo'nalishini o'zgartiradi.

Nazorat savollari:

1. O'zgarmas tok generatori (O'TG)ning tuzilishi va ishlash prinsipini so'zlab bering.

2. Mustaqil qo'zg'atishli O'TG ning tashqi va rostlash xarakteristikalarini tahlil qilib bering.

3. Parallel qo'zg'atishli O'TG ning mustaqil qo'zg'atishli turidan asosiy afzalligi nimadan iborat?

4. Parallel qo'zg'atishli O'TG ning o'z-o'zini qo'zg'atish jarayoni qanday sodir bo'ladi?

5. Aralash qo'zg'atishli O'TG dagi ketma-ket qo'zg'atish chulg'ami qanday vazifani bajaradi?

31-BOB. O‘ZGARMAS TOK MOTORLARI

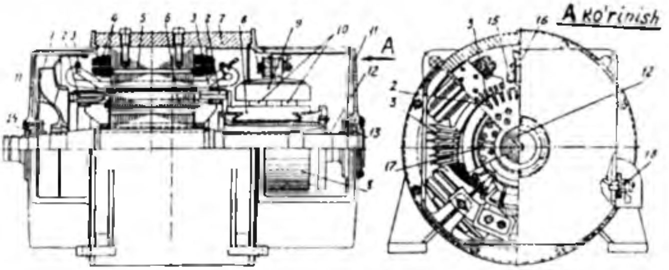
31.1. Ishlash prinsipi va ish jarayonining asosiy tenglamalari

Boshqa EM lari kabi O‘T mashinalari ham Lens kashf qilgan *qaytarlik xossasiga* binoan, ular generator sifatida ham, motor sifatida ham ishlay oladilar.

Tuzilishi. O‘TM ning tuzilishi generatornikidan farq qilmaydi, ya’ni *qo‘zg‘almas qismi — stator*: stanina, bosh va qo‘shimcha qutblar, qo‘zg‘atish chulg‘ami, cho‘tka tutqich (cho‘tkalari bilan), podshipnik qalqonlari va boshqa yordamchi qismlardan iborat (31.1-rasm).

Asosiy qutblar mashinaning asosiy magnit oqimini hosil qiladi. Qo‘shimcha qutblar esa mashinaning cho‘tkalari joylashgan o‘qi, ya’ni geometrik neytral (ko‘ndalang o‘qi) bo‘yicha yuklama tokiga mutanosib ravishda o‘zgaradigan magnit maydonini hosil qilib, cho‘tkalarning uchqunsiz ishlash sharoitini (kommutatsiyani) yaxshilaydi.

Aylanadigan qismi — yakor. Tuzilishi: yakor chulg‘ami, kollektor, ventilator, podshipnik, val va boshqa yordamchi qismlardan iborat (31.1-rasm).



31.1-rasm. *Umumiy maqsadli **P** seriyaga mansub bo‘lgan **o‘zgarmas tok motori:***

***1** — ventilator; **2** — yakor chulg‘ami; **3** — kompensatsion chulg‘am; **4** — bosh qutb qo‘zg‘atish chulg‘amining g‘altagi; **5** — bosh qutb o‘zagi; **6** — yakorning po‘lat o‘zagi; **7** — stanina (tana gardishi); **8** — kollektor plastinasi; **9** — cho‘tka tutqich; **10** — cho‘tkalar; **11, 11′** — oldingi va orqa tomondagi podshipnikli qalqonlar; **12** — val; **13, 14** — sharikli (kollektor tomondagi) va rolikli (orqa tomondagi) podshipniklar; **15** — qo‘shimcha qutb qo‘zg‘atish chulg‘amining g‘altagi; **16** — qo‘shimcha qutb o‘zagi; **17** — ventilatsion kanallar; **18** — qisqich.*

Yakorning o'zagi qalinligi 0.5 mm bo'lgan elektrotexnik po'lat list (tunuka)lardan yig'iladi. Bu holda uyurma toklar tufayli hosil bo'ladigan isroflar kamayadi.

Ishlash prinsipi. O'TM larining ishlashi "magnit maydoniga joylashtirilgan tokli o'tkazgich orasida o'zaro ta'sir kuchi vujudga kelishi"ga asoslangan. Bu hodisaning asosida quyidagi kashfiyotlar: "tokli o'tkazgichning magnit strelkasiga ta'siri" (Ersted); "tokning magnit qutbiga ta'siri" (Bio va Savar) va Amperning "Elektrodinamik hodisalar nazariyasi" yotadi.

Agar O'T mashinasi O'T energiya manbayiga ulansa, mashinaning qo'zg'atish chulg'amidan va yakor chulg'amidan toklar o'tadi. Yakor toki qo'zg'atish maydoni (asosiy maydon) bilan ta'sirlashib yakor valida elektromagnit moment M ni hosil qiladi. Lekin bu moment generatordagi singari tormozlovchi emas, balki aylantiruvchi bo'ladi va uning ta'sirida mashina yakori aylana boshlaydi. Bu holda mashina, tarmoqdan elektr energiyani olib, motor sifatida ishlaydi va uni mexanik energiyaga aylantiradi.

O'T mashinasi generator sifatida ishlaganida kollektor va cho'tkalar *to'g'rilagich vazifasini* bajaradi. Motor rejimida ishlaganida esa, kollektor va uning sirtiga tegib turuvchi cho'tkalarni, o'tkazgichlaridan o'zgaruvchan tok o'tuvchi yakor chulg'amini O'T tarmog'i bilan bog'lovchi, chastota o'zgartirgich, deb qarash mumkin.

Qutblarning berilgan qutbiyligi (ishorasi)da va yakor aylanishining ma'lum yo'nalishida yakor chulg'amidagi EYK ning yo'nalishi generator va motor rejimlarida ishlaganida bir xil bo'lib, yakor chulg'ami tokining yo'nalishi har xil bo'ladi. Shu sababdan O'TM yakorining magnit maydoni generator rejimdagiga nisbatan yo'nalishi teskari bo'lib, yakor reaksiyasi ham teskari ta'sir qiladi, ya'ni:

1) cho'tkalar geometrik neytralda bo'lganida ko'ndalang yakor reaksiyasi asosiy magnit maydonini qutb o'qidan o'ng tomonida susaytiradi, uning chap tomonida esa, kuchaytiradi;

2) cho'tkalar yakor aylanishi tomonga siljigan bo'lsa, yakorning bo'ylama magnit yurituvchi kuchi (MYK) ham vujudga keladi, agar cho'tkalar teskari tomonga siljigan bo'lsa, bu MYK bo'ylama magnitsizlovchi ta'sir qiladi.

Odatda, O'TMda cho'tkalarni yakor aylanishiga teskari tomonga siljitiladi, ***bu holda MYK magnitsizlovchi ta'sir qilib, yakor aylanish chastotasini o'zgartiradi.***

O'TM *larining ish jarayoni:* ishga tushirish, ish, mexanik, rostlash va tormozlash xarakteristikalaridan iborat bo'ladi.

Ish jarayonining asosiy tenglamalari. O'TM larining istalgan rejimdagi ishini momentlarining va elektr yurituvchi kuchlarining muvozanat tenglamalari belgilaydi.

O'TM da asosiy maydon va yakor chulg'amining tokli o'tkazgichlari o'zaro ta'sirlashuvi natijasida hosil bo'ladigan elektromagnit moment M_{em} yakorni aylanma harakatga keltiradi va shu sababli, uni *aylantiruvi moment* deyiladi. Uning kattaligi quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$M = N\, p\, \Phi \cdot I_a / (2\pi \cdot a) = C_M \Phi\, I_a, \qquad (31.1)$$

bu yerda: N, a — tegishlicha yakor chulg'amining o'tkazgichlari va parallel shoxobchalari sonlari; r — mashinaning juft qutblari soni; $C_m = p \cdot N/(2\pi \cdot a)$ — berilgan mashinaning konstruksiyasiga bog'liq bo'lgan o'zgarmas kattalik; Φ — mashinaning natijaviy magnit oqimi.

O'TM momentlarining muvozanat tenglamasi quyidagicha yoziladi:

$$M = M_0 + M_2 \pm M_D, \qquad (31.2)$$

bunda $M_D = J \cdot d\omega/dt$ — dinamik moment. Bu momentning "musbat" ishorasi — rotor tezlanishda bo'lganida va "manfiy" ishorasi esa rotor aylanishi sekinlashganda qabul qilinadi.

(31.2) tenglamadan: O'T mashinasining istalgan rejimdagi ishida uning aylantiruvchi (M_{em}) va tormozlovchi (M_T) momentlari miqdor jihatdan o'zaro teng va yo'nalishi jihatdan qarama-qarshidir, *degan xulosa kelib chiqadi.*

Barqarorlashgan ish rejimda O'TM n = const aylanish chastota bilan ishlaydi, demak, bu rejimda $M_D = 0$, shuning uchun (31.2) ifoda quyidagicha yoziladi:

$$M = M_0 + M_2\,. \qquad (31.3)$$

O'T mashinasining yakori magnit maydonda aylanganida yakor chulg'ami o'tkazgichlarida, elektromagnit induksiya qonuniga muvofiq, EYK vujudga keladi. Uning qiymati quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$E_a = C_E \Phi \cdot n, \qquad (31.4)$$

bunda $C_E = p \cdot N / (60a)$ — berilgan mashina uchun o'zgarmas bo'lgan kattalik; n — yakorning aylanish chastotasi.

Bu EYK ning yo'nalishi yakor chulg'ami toki yo'nalishiga qarama-qarshi bo'ladi, demak, yakor zanjiri uchlariga berilgan kuchlanish U ga ham teskari yo'nalgan bo'ladi. Shu sababli O'TM yakor chulg'amining EYK ($-E_a$) — *teskari EYK* deyiladi.

O'TM EYK larining muvozanat tenglamasi quyidagicha yoziladi:

a) umumiy hol uchun:

$$U = e_a + i_a R_a + L_a di_a / dt; \qquad (31.5)$$

b) barqaror ish rejimi uchun:

$$U = E_a + I_a R_a, \qquad (31.6)$$

bunda E_a va i_a – yakor chulg'ami EYK va toklarining oniy qiymatlari; R_a – yakor zanjirining to'la qarshiligi; $L_a di_a / dt = 0$; E_a – teskari EYK ($-E_a$) ni muvozanatlaydigan kuchlanishning tashkil etuvchisi; barqaror rejimda tok I_a ham miqdor jihatdan o'zgarmasdir.

(31.6) dan yakor tokining qiymatini topamiz:

$$I_a = (U - E_a) / R_a. \qquad (31.7)$$

(31.7) tenglama O'TM ishini xarakterlovchi *nihoyatda muhim tenglama* hisoblanadi.

31.2. O'zgarmas tok motorlarini ishga tushirish

Ishga tushirish jarayoni quyidagilar bilan, ya'ni: a) ishga tushirish tokining karrali ($I_{i.t}/I_N$); b) ishga tushirish momentining karrali ($M_{i.t}/M_N$); d) ishga tushirish jarayonining ravonligi; e) ishga tushirish davri $t_{i.t}$; f) ishga tushirish uskunalarining tannarxi va energiya sarflari bilan bilan xarakterlanadi.

O'TM larini ishga tushirishning quyidagi usullari qo'llaniladi:

1) bevosita ("reostatsiz") ishga tushirish, bunda yakor chulg'ami to'g'ridan to'g'ri, ya'ni reostatsiz elektr tarmog'iga ulanadi.

2) reostatli ishga tushirish, bunda tokning qiymatini cheklash maqsadida yakor zanjiriga ketma-ket qilib maxsus ishga tushirish reostati yoki qo'shimcha qarshilik ulanadi.

3) maxsus ishga tushirish agregati yordamida ishga tushirish (bunda yakor chulg'amiga beriladigan kuchlanishni ravon oshirish ko'zda tutiladi).

a) O'T mashinasini bevosita ishga tushirish. Dastlabki paytda motorning aylanish chastotasi n = 0 bo'lganligidan, yakor chulg'ami EYK E_a=0 bo'lib, yakor chulg'amining toki quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$I_{i.t} = U / R_a. \qquad (31.8)$$

Yakor zanjiri qarshiligi r_a ning qiymati kichik bo'lganligidan ishga tushirish toki nominal tokka nisbatan 10÷20 marta katta bo'lib, mashina kollektorida kuchli uchqun chiqishiga olib keladi va zarbiy moment hosil bo'ladi. Bu hol O'TM ulangan tarmoq uchun ham, motorning valiga ulangan mexanizm uchun ham zararlidir. Shu sababli O'TM ni

bevosita ishga tushirish usuli faqat kam quvvatli elektr motorlarida qo'llaniladi, chunki bunday EMlarida yakor chulg'ami qarshiligi r_a ning qiymati nisbatan katta bo'ladi (chunki qarshilik r_a ning qiymati simning kesim yuzasiga teskari mutanosibda bo'lishligidir).

Hozirgi vaqtda ishga tushirish toki nominal tokdan 6÷8 marta oshganda ham, quvvati 6 kW gacha bo'lgan O'TM larini reostatsiz (tezkor avtomatlar qo'llash yo'li bilan) ishga tushirish mumkinligi aniqlangan. Bunda aylanish chastotani oshirish jarayoni yakor zanjiriga bir nechta kuchlanish impulsini berib amalga oshiriladi, ya'ni tokning qiymati oldindan belgilangan qiymatga yetganda yoki undan oshganda avtomat yakor zanjirini uzib qo'yadi va bu tok oldindan belgilangan qiymatga kamayganda avtomat yakor zanjirini tarmoqqa qaytadan ulab beradi.

b) O'TM ni "reostatli" ishga tushirish. Quvvati $P > 0{,}5$ kW bo'lgan O'TMlarida ishga tushirish tokini kamaytirish uchun yakor zanjiriga ketma-ket qilib ishga tushirish reostatini ulaydilar. Ishga tushirish jarayoni silliq o'tishi uchun ishga tushirish reostati qarshiligini, odatda alohida elementlardan iborat bo'lgan ko'p pog'onali (1...4) qilib bajariladi. Bu holda ishga tushirish toki quyidagiga teng bo'ladi:

$$I_{it} = U/(r_a + R_r), \qquad (31.9)$$

bu yerda R_r – ishga tushirish reostatining qarshiligi.

O'TM ni ishga tushirish davri t_{it} nisbatan ko'p bo'lmaganligidan, ishga tushirish reostatining qarshiligi shunday tanlanadiki, bunda ishga tushirish toki $I_{it} \leq (2÷3)\, I_N$ bo'lishi kerak.

Quvvati katta bo'lgan O'TM larini ishga tushirish uchun reostatlarni qo'llash maqsadga muvofiq bo'lmaydi, sababi, bunda O'TM aylanuvchi qismlari massasining momenti J ga to'g'ri mutanosib bo'lgan energiya isroflari katta bo'ladi. Shuning uchun bunday O'TMini ishga tushirishda kuchlanishni kamaytirish yo'li maxsus ishga tushirish agregatidan foydalanib amalga oshiriladi (masalan, elektrovozning tortish O'TM larini ishga tushirishda) yoki elektr motorlarini "generator – motor" sxemasi yordamida ishga tushiriladi.

d) Parallel qo'zg'atishli motorni ishga tushirish. Reostatli ishga tushirish amalda eng ko'p qo'llaniladigan usuldir.

31.2-rasmda uchta (L, Sh, Y*a*) uchli ishga tushirish reostatining sxemasi ko'rsatilgan. Ko'rilayotgan reostat o'zaro ketma-ket ulangan to'rtta pog'onadan iborat. Bular 6 ta kontaktga ega bo'lib, ulardan boshlang'ichi – nol (0), to'rtta (1÷4) oraliqdagi va oxirgisi (5) – ishchidir. 4 – pog'onaning oxiri 5 – kontakt va "Y*a*" harfi bilan

belgilangan ulanish joyiga birlashtirilgan: "M" harfi bilan belgilangan misdan yasalgan yoy esa "Sh" harfi bilan belgilangan ulanish joyiga birlashtirilgan. Siljiydigan kontaktlari reostatining tutqichiga mahkamlangan va "L" harfi bilan belgilangan ulanish joyi bilan biriktirilgan bo'lib, bu kontaktlar yordamida tarmoq simining birontasiga ulanadi.

Ishga tushirishdan oldin reostatning tutqichiga mahkamlangan siljiydigan kontaktning uchi "0" kontaktida bo'lishi shart.

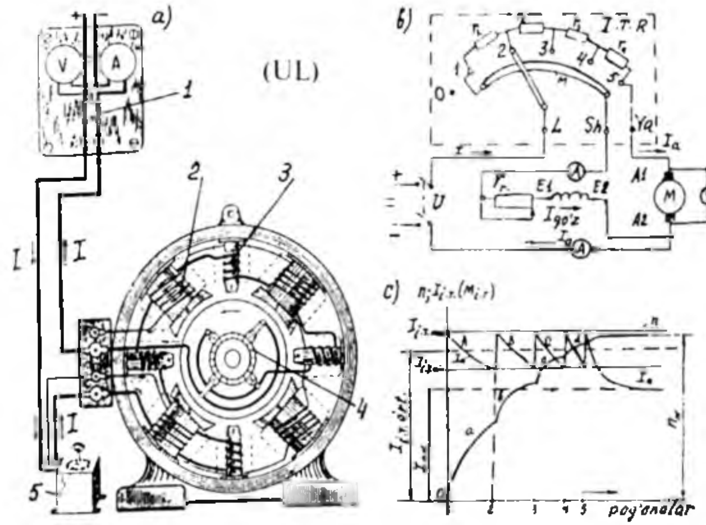
Yakor zanjiridagi ishga tushirish tokining cheklangan qiymatida ishga tushirish momentini oshirish maqsadida asosiy qutb magnit oqimining qiymatini ko'paytirish uchun qo'zg'atish sistemasidagi rostlash reostatining qarshiligi $r_{r.qo'z} \approx 0$ bo'lishi kerak (31.2.*a*-rasm). Ishga tushirish reostatining tutqichini kontakt "0" dan kontakt "1" ga ko'chirganda qo'zg'atish chulg'amiga, darhol, qiymati $U_q = U$ bo'lgan kuchlanish beriladi, yakor chulg'amiga esa, uning zanjiri bu holda ishga tushirish reostatining to'la $R_{i.t.r} = r_1 + r_2 + r_3 + r_4$ qarshiligiga ulanganligi sababli, pasaygan kuchlanish beriladi. Natijada qo'zg'atish chulg'amidagi tokning qiymati katta bo'lib, yakor zanjiridan esa (31.9) tenglama bilan aniqlanadigan tok o'tadi. Ishga tushirishning boshlanishida yakorning aylanish chastotasi n = 0 bo'lganligidan (31.9) ning suratidagi $E_a = 0$ bo'ladi.

Agar yakor reaksiyasi O'TMining asosiy magnit oqimiga ta'sir qilmaydi deb hisoblasak, unda Φ=const bo'ladi. Tok $I_{i.t.max}$ ga boshlang'ich ishga tushirish momenti to'g'ri keladi:

$$M_{i.t} = C_m \Phi I_{i.t.max}\ . \qquad (31.10)$$

Agar bu moment $M_{i.t} > M_{st} = M_0 + M_2$ bo'lsa, unda O'TM ning yakori aylana boshlaydi. Bunda yakor chulg'amini hosil qiladigan o'tkazgichlar o'zgarmas magnit oqimning kuch chiziqlarini kesadi va $I_{qo'z}$ = const bo'lganligidan, bu o'tkazgichlarda yakorning aylanish chastotasi n ga mutanosib bo'lgan teskari EYK vujudga keladi (31.2.*b*-rasm,"*a*"egri chizig'i). Shu rasmdagi "A" egri chiziq esa, teskari EYK vujudga kelganligi tufayli (31.9) ifodaga binoan, ishga tushirish tokining va (31.10) ifodaga ko'ra bu tokka mutanosib bo'lgan ishga tushirish momentining kamayishini ko'rsatadi (chunki qo'zg'atish toki $I_{qo'z}$ = const bo'lganda qo'zg'atish magnit oqimi ham $\Phi_{qo'z}$ = const bo'ladi va bitta "A" egri chizig'i orqali har xil masshtabda ifodalangan ishga tushirish toki $I_{i.t}$ va ishga tushirish momenti $M_{i.t}$ ko'rsatilgan).

Ishga tushirish toki $I_{i.t.min}$ qiymatgacha kamayganda reostatining



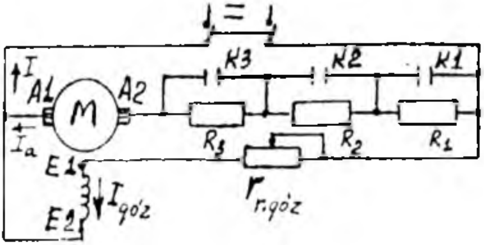
31.2-rasm. *Parallel qo'zg'atishli o'zgarmas tok motorda:* ***a*** *- tajriba o'tkazish qurilmasi (bunda:* ***1*** *— ulab uzgich (UL);* ***2*** *— qo'zg'atish chulg'ami;* ***3*** *— qo'shimcha qutb chulg'ami;* ***4*** *— kollektor;* ***5*** *— ishga tushirish reostati);* ***b*** *— motorni ishga tushirish sxemasi (ITR — ishga tushirish reostati, M — mis yoyi);* ***d*** *— «reostatli» ishga tushirish jarayonidagi tok, moment va aylanish chastotalarining o'zgarish xarakteri.*

"*T*" tutqichi kontakt "2" ga ko'chiriladi (bunda 1-pog'onaning qarshiligi r_1 keyingi jarayonda qatnashmaydi). Bu holda tok yana $I_{i.t.max}$ gacha yetadi va O'TM ning aylanish chastotasi ham "b" egri chizig'i bo'ylab o'sadi, bunda ishga tushirish toki va momenti "B" egri chizig'i bo'ylab kamayadi. Bu jarayon 31.2,*b*-rasmda ko'rsatilganidek quyidagi tartibda boradi, ya'ni aylanish chastotasining o'zgarishini ifodalovchi egri chiziqlar *a*-*b*-c-d; tok va momentniki esa — A-B-C-D. Bu jarayon reostatning tutqichi 5-kontakt bilan ulangunga qadar davom qiladi va bundan keyin O'TM, yakor toki I_a va aylanish chastotasi *n* bo'lgan barqaror ish rejimda ishlaydi.

O'TM ni tarmoqdan uzishda yakor tokini kamaytirish maqsadida reostat tutqichini kontakt 5 dan kontakt 0 ga qadar birin-ketin ko'chiriladi; bunda ishga tushirish reostatining to'la qarshiligi yakor zanjiriga ulangan bo'ladi va yakor toki kamayadi. Bundan keyin ulab-uzgich "Ul" yordamida O'TM tarmoqdan uziladi (31.2,*b*-rasm).

Kontakt I va mis yoyi "M" orasidagi *tutashmaning mavjudligi katta ahamiyatga ega* bo'lib, u qo'zg'atish chulg'ami, yakor chulg'ami va reostatlardan iborat bo'lgan berk konturni hosil qiladi. Bu konturda tarmoqdan uzilgan O'TM qo'zg'atish chulg'amining elektromagnit energiyasi issiqlik energiyaga aylanadi. Agar bu tutashma bo'lmay, qo'zg'atish chulg'ami birdaniga tarmoqdan uzilganda, bu chulg'amda haddan tashqari o'zinduksiya EYK hosil bo'lib, bu esa, chulg'am izolatsiyasini ishdan chiqarishi mumkin.

Ishga tushirish vositalari odatda ishga tushirish toki maksimal qiymatining qisqa vaqt ichida o'tishiga mo'ljallangan, shu sababli ularni O'TM ning normal ish jarayonidagi aylanish chastotasini rostlash maqsadida ishlatib bo'lmaydi, hamda O'TMini ishga tushirgandan keyin ishga tushirish reostatining pog'onalari kuyib qolmasligi uchun oxirgi pog'onalarini ulangan holda qoldirib bo'lmaydi.



31.3-rasm. *Avtomatlashtirilgan elektr yuritmasida parallel qo'zg'atishli O'TM ni ishga tushirishning prinsipial sxemasi.*

Avtomatlashtirilgan elektr yuritmasida O'TMini ishga tushirish uchun bir nechta pog'onaga bo'lingan qarshiliklar (R_1, R_2, R_3)dan foydalanadilar (31.3-rasm) bunda ishga tushirish kontaktlari (K_1, K_2 va K_3) vositasida ular navbatma-navbat shunt qilinadi.

e) **Ketma-ket va aralash qo'zg'atishli motorlarni ishga tushirishning o'ziga xos xususiyatlari.**

Bunday motorlarni ishga tushirish parallel qo'zg'atishli motordagi kabi, ishga tushirish reostati vositasida amalga oshiriladi, lekin o'ziga xos xususiyatlarga ega.

Ketma-ket qo'zg'atishli motorda ishga tushirish momenti parallel qo'zg'atishlinikiga nisbatan katta bo'ladi va (31.10) ifoda bilan aniqlanadi:

Bu momentning katta bo'lishiga sabab, yakor chulg'amidan o'tuvchi ishga tushirish tokining oshishi bilan, bu chulg'amga ketma-ket ulangan

qo'zg'atish chulg'amining magnit oqimi ham o'sadi. Ketma-ket qo'zg'atishli motorlarning *bu xossasi* ayrim elektr yuritmalarda, masalan, yuk ko'taradigan moslamalarda, tortish qurilmalarida va boshqa hollarda *katta ahamiyatga ega* bo'ladi.

Ketma-ket qo'zg'atishli motorlarning quyidagi o'ziga xos xususiyatlarini, ya'ni bu motorlarni salt ishlash holatida (valiga yuk ulanmagan holatda) va shuningdek, yuklamaning miqdori nominalga nisbatan 25% dan kam bo'lgan hollarda, ishga tushirish qat'iyan mumkin emasligini esda tutish lozim bo'ladi. Chunki bunday hollarda mashina magnit zanjiri to'yinmagan bo'lib, magnit oqimi F yakor toki I_a ga to'g'ri mutanosib ($F = I_a$) ravishda o'zgarganligi sababli aylantiruvchi momenti M_{em} yakor tokining kvadrati (I_a^2) ga to'g'ri mutanosib ravishda o'zgaradi, ya'ni:

$$M = C'_m I_a^2. \qquad (31.11)$$

(31.5) va (31.6) ifodalardan aniqlangan quyidagi

$$n = (U - I_a R_a)/ (C_E \Phi) \qquad (31.12)$$

tenglamadan ko'rinishicha, ketma-ket qo'zg'atishli motor mexanik jihatdan zararli (me'yordan katta) bo'lgan aylanish chastotasini hosil qiladi.

Aralash qo'zg'atishli motorning parallel va ketma-ket qo'zg'atish chulg'amlari mos ulangan bo'lsa, u xuddi parallel qo'zg'atishli motordek ishga tushiriladi. Agar qo'zg'atish chulg'amlari o'zaro teskari ulangan bo'lsa, O'TMni ishga tushirish qiyinlashib qoladi. Bu holda ketma-ket qo'zg'atish chulg'ami butun ishga tushirish jarayoni davomida shuntlanadi (qisqa tutashtiriladi).

31.3. O'zgarmas tok motorlarining ish xarakteristikalari

Bu xarakteristikalar elektr motorlarining barqaror ish rejimidagi xossalarini belgilaydi. Bu xarakteristikalar yakor chulg'amiga berilgan kuchlanish $U_l = U_N$ = const, hamda parallel (yoki mustaqil) qo'zg'atish zanjiri kuchlanishi $U_{qo'z}$ = const va $r_{qo'z}$ = const (demak, $I_{qo'z}$ = const) shartlar bajarilganda olinadigan n, M, I_a va $\eta = f(P_2)$ bog'liqlikdir.

$\eta = f(P_2)$ bog'lanishdan tashqari barcha ish xarakteristikalari O'TM turiga, ya'ni uning qo'zg'atish usuliga bog'liq bo'ladi. Masalan, parallel qo'zg'atishli motorlarda (mustaqil qo'zg'atishlisida ham) qo'zg'atish chulg'amining magnit oqimi $\Phi_{qo'z}$ yuklamaning miqdoriga deyarli bog'liq bo'lmaydi, ketma-ket qo'zg'atish motorlarda esa, bu yuklama tokiga kuchli bog'liq bo'ladi.

a) Parallel qo'zg'atishli motorning ish xarakteristikalari.

Quyida mazkur O'TM larida $U_a = U_N$ = const va $I_{qo'z} = I_{qo'zN}$ = const bo'lgandagi n, M, I_a, $\eta = f(P_2)$ bog'liqlik bilan ifodalanuvchi ish xarakteristikalarini ko'rib chiqamiz (31.4-rasm). Qo'zg'atish tokining nominal qiymati ($I_{qo'zN}$) qilib, O'TM ning validagi yuki nominal ($M_2 = M_{2N}$) va aylanish chastotasi $n = n_N$ bo'lgan ish rejimdagi kattaligi qabul qilinadi.

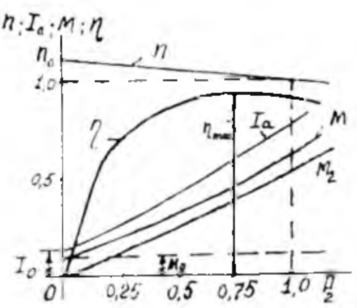
Aylanish chastotasi n ning foydali quvvat P_2 ga bog'lanishi – $n = f(P_2)$, *tezlik xarakteristikasi* – $n = f(I_a)$ egri chizig'iga yaqin bo'ladi.

(31.12) tenglama parallel qo'zg'atishli motor uchun ham to'g'ri kelib, aylanish chastotaning pasayishi natijasida, yakorning teskari EYK E_a kamayadi, bu esa yakor toki I_a ning va yakor reaksiyasining oshishiga olib keladi. Magnit zanjiri to'yingan mashinalarda ko'ndalang yakor reaksiyasi nisbatan magnitsizlovchi ta'sir ko'rsatadi. Bu ta'sir esa, asosiy qutblarning magnit oqimini nisbatan kamaytiradi va shu sababli, O'TM lari aylanish chastotasining nisbatan oshishiga olib keladi.

Mexanizmlarning odatdagi mexanik xarakteristikalarida ish turg'unligi uchun O'TM ning tezlik xarakteristikasi kamayuvchi bo'lishi zarur.

Shu maqsadda, parallel qo'zg'atishli O'TM larini loyihalaganda uning validagi yuk oshganda yakor zanjiridagi kuchlanish pasayishi ($I_a R_a$) ning ortishi tufayli aylanish chastotaning kamayishi, asosiy qutblar magnit oqimi $\Phi_{qo'z}$ ning kamayishi sababli aylanish chastotaning o'sishiga nisbatan kattaroq bo'lishi ta'minlanadi. Bunda yuklama noldan nominalgacha oshganda n ning pasayishi $\Delta n = (3 \div 8)$ foizni tashkil qiladi.

Valdagi yuk 0 dan nominal qiymatgacha o'zgarganda, parallel qo'zg'atishli motorning tezlik xarakteristikasi – $n = f(P_2)$ deyarli to'g'ri chiziq ko'rinishida o'zgarib, absissalar o'qiga nisbatan kam og'gan



31.4-rasm. *Parallel qo'zg'atishli motorning ish xarakteristikalari*

bo'ladi va shu sababli, uni *bikir (ya'ni kam o'zgaruvchi) xarakteristika* deyiladi. Parallel qo'zg'atishli motor aylanish chastotasining valdagi yukka nisbatan kuchsiz bog'liqligi *muhim ahamiyatga ega bo'lgan xossalaridan biri hisoblanadi.*

Moment xarakteristikasi — $M_2 = f(P_2)$ ko'rinishdagi bog'lanishdir. O'TM foydali momenti M_2 ning kattaligi uning validagi foydali quvvatga to'g'ri mutanosib bo'lib, quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$M_2 = P_2/\omega = P_2/(2p \cdot n/60) =$$
$$=60/(2p) \cdot P_2/n = 9{,}55\ P_2/n. \qquad (31.13)$$

bunda P_2 [W]; M_2 [N · m]; n [ayl / min].

Aylanish chastotasi n = const bo'lganda (31.13) tenglamaga binoan M_2 koordinatalar boshidan chiqadigan to'g'ri chiziq ko'rinishida bo'lar edi. Ammo valdagi yukning oshishi bilan O'TM ning aylanish chastotasi biroz kamayadi, shuning uchun ham moment M_2 quvvat P_2 ga nisbatan tezroq o'sadi (31.4-rasm).

Aylanish chastotasi deyarli o'zgarmas bo'lgani uchun magnit va mexanik isroflari o'zgarmas deyilsa bo'ladi, natijada O'TMining salt ishlashdagi momenti M_0= const bo'ladi. Shu sababdan barqaror ish rejimdagi O'TMining momentlari muvozanat tengalamasi (31.4) ga binoan M= $f(P_2)$ egri chizig'i, foydali momentining o'zgarishi $M_2=f(P_2)$ dan kattaligi M_0 ga teng bo'lgan oraliqda yuqorida joylashadi va M_2 ning o'zgarishiga o'xshash bo'ladi.

O'TMning foydali quvvati P_2 ning oshishi bilan uning aylanish chastotasi biroz pasayadi; yakor reaksiyasi ta'sirida esa magnit oqimi biroz kamayadi, shu sababli $I_a = f(P_2)$ bog'liqlik M= $f(P_2)$ egri chizig'iga nisbatan ordinatalar o'qi tomonga ko'proq og'adi.

P_2= 0 da salt ishlash toki $I_0 = I_{0(a)} + I_{qo'z}$, nominal tokning (5÷10) foizni tashkil qiladi. Bunda $I_{0(a)}$ — salt ishlash tokining yakor chulg'amidan o'tadigan qismi bo'lib, nominal tokning (3÷7) foiz ni tashkil qiladi. Kichik raqamlar — katta quvvatli elektr motorlariga, kattasi esa — kam quvvatlilarga to'g'ri keladi. Shu sababli $I_a = f(P_2)$ bog'lanishning o'zgarish egri chizig'i koordinatalar boshi 0 ga nisbatan kattaligi I_0 ga teng bo'lgan masofada joylashgan ordinata nuqtasidan boshlanadi.

31.4-rasmda FIK ning maksimal qiymati η_{max} ga yuklamaning P_2=(3/4) P_N qiymati to'g'ri keladi. FIK η_{max} bo'lgan nuqtaning chap tomonida o'zgarmas isroflar ko'p bo'lsa, undan o'ng tomonida esa elektr isroflari (o'zgaruvchan isroflar) ko'p bo'ladi. FIK ga oid batafsil

ma'lumot 33.3-bandda berilgan.

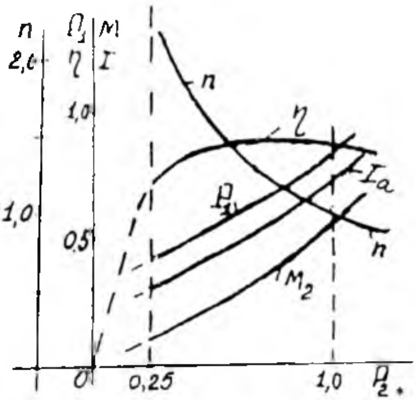
b) Ketma-ket qo'zg'atishli motorning ish xarakteristikalarini $U=U_N$ = const bo'lganda foydali quvvat P_2 ga bog'liq ravishda emas, balki yakor toki I_a ga nisbatan bog'liqlikda tasvirlash qulay hisoblanadi: *n*, M, P_2, $\eta = f(I_a)$. Bu ikkala bog'liqlik o'rtasida farq kam, chunki U_a = const bo'lganda P_2 taxminan tok I_a ga mutanosibdir.

Ketma-ket qo'zg'atishli motorda qo'zg'atish toki yakor tokiga teng ($I_{qo'z}=I_a$) va u bilan bir vaqtda o'zgaradi. Qo'zg'atish tokining valdagi yukka nisbatan bunday mutanosib ravishda o'zgarishi mazkur motor ish xarakteristikalarining parallel qo'zg'atishli motor ish xarakteristikalaridan *keskin farq qilishiga sababchi bo'ladi.*

Ketma-ket qo'zg'atishli motor validagi yukning oshishi bilan qo'zg'atish toki ham oshadi, demak, O'TM ning asosiy magnit oqimi F ham mashina magnitlanish egri chizig'i bo'yicha ko'paya boradi. Demak, ketma-ket qo'zg'atishli motorning aylanish chastotasi yuk oshishi bilan tezda pasayadi.

$U=U_N$= const bo'lgandagi $n=f(I_a)$ bog'liqlik – tezlik xarakteristikasini *ifodalaydi. (31.12) tenglamaga binoan ketma-ket qo'zg'atishli motor aylanish chastotasining o'zgarishi quyidagilarga, ya'ni: 1) asosiy magnit oqimining o'zgarishiga, 2) yakor zanjirida kuchlanish pasayishi ($I_a r_a$)ga va 3) yakor reaksiyasiga* bog'liq bo'ladi.

So'nggi ikkita sabab *birinchiga qaraganda ikkinchi darajali omillar hisoblanadi va ular o'zaro teskari yo'nalishda ta'sir qilishgani sababli* ketma-ket qo'zg'atishli motorning aylanish chastotasi n amalda faqat asosiy magnit oqimining o'zgarishiga bog'liq bo'ladi.



31.5-rasm. *Ketma-ket qo'zg'atishli motorning foydali quvvat R2 ga nisbatan olingan ish xarakteristikalari.*

Agar ketma-ket qo'zg'atishli motorning magnit zanjiri to'yinmagan (tokning $I_a < 0{,}8I_N$ qiymatlarida) bo'lsa, magnit oqimi F tokka mutanosib ($\Phi \approx I_a$) ravishda o'zgaradi va buni quyidagicha yozish mumkin bo'ladi:

$$\Phi = K_I I_a . \qquad (31.14)$$

Bunda O'TM larining aylanish chastotasi yuklama toki $I = I_a$ ga teskari mutanosibda bo'lib, *tok (demak, Φ ham) kamaygan sari tobora oshadi* va o'zgarish xarakteri giperbola ko'rinishiga yaqin bo'ladi (31.5-rasm).

Teskari EYK lar muvozanati tenglamasi (31.6)ga binoan, kuchlanishni $U = U_N$ = const qilish uchun, magnit oqimi Φ ning kamayishida O'TM aylanish chastotasining oshishi lozim bo'ladi.

O'TM aylanish chastotasining haddan tashqari ko'payishiga, mexanik sabablarga ko'ra yo'l qo'yib bo'lmaydi. Xuddi shu sababdan, umumiy maqsadli ketma-ket qo'zg'atishli motorlarni salt ishlash rejimda, ya'ni yuksiz ishga tushirish yoki normal ishlayotganida yukini nominalga nisbatan 25 % dan pastga tushirish mumkin emas.

Ketma-ket qo'zg'atishli motorning yuksiz ishlab qolishi ro'y bermasligi uchun uning aylanma harakatini tasma vositasida uzatishga yo'l qo'yilmasdan, balki yuk mexanizmi bilan qattiq birlashtirilib qo'yiladi. Ketma-ket qo'zg'atishli motorning aylanish chastotasi qancha oshsa ham, u generator rejimiga o'tmaydi, ya'ni tezlik xarakteristikasi — $n = f(I_a)$ ordinatalar o'qini kesib o'tmaydi.

Aylantiruvchi momentning o'zgarishi. Agar tahlilni soddalashtirish maqsadida M_0 ni e'tiborga olmasak, unda (31.4) va (31.2) ifodalarga asosan quyidagiga ega bo'lamiz:

$$M = M_0 + M_2 \approx M_2 = C_M I_a \Phi. \qquad (31.15)$$

Magnit zanjiri to'yinmagan O'TM da magnit oqimi Φ qo'zg'atish toki $I_{qo'z}$ ga to'g'ri mutanosibda bo'lganligidan, (31.14) tenglamani hisobga olgan holda momentning ifodasini quyidagicha yozish mumkin:

$$M = C_M K_I I^2_a = C'_M I^2_a . \qquad (31.16)$$

Momentning bunday ifodalanishida $M = f(I_a)$ egri chizig'ining parabola ko'rinishiga o'xshashligidan dalolat beradi. Odatda, valdagi yukning oshishi bilan magnit zanjiri to'yinib, magnit oqimi $\Phi \approx$ const bo'ladi. Bu holda *ketma-ket qo'zg'atishli motor uchun* momentni quyidagicha yozamiz:

$$M = C_M \Phi I_a = C_3 I_a , \qquad (31.17)$$

bu yerda $C_3 = C_M \Phi$ — o'zgarmas kattalik.

Ketma-ket qo'zg'atishli motor momentining kuchayishi yuklama

tokining kvadratiga to'g'ri mutanosibligi ($M \approx I^2$) *juda muhim amaliy ahamiyatga ega*. Bu ayniqsa, katta qiymatli ishga tushirish momenti talab qilinadigan mexanizmlarda, ya'ni kranlar, metro, tramvay, trolleybus, avtomobillardagi starter va elektrovozlar, shuningdek O'TM o'ta yuklanish qobiliyatiga ega bo'lishi kerak bo'lgan hollarda *muhim ahamiyatga* ega bo'ladi.

Foydali ish koeffitsientining o'zgarishi – $\eta = f(P_2)$ (31.6-rasm). Ma'lumki, foydali quvvat quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$P_2 = U \cdot I_a \cdot \eta . \qquad (31.18)$$

Ketma-ket qo'zg'atishli motorning validagi yuki $P_2 \approx 0,5P_N$ dan $P_2=1,25P_N$ gacha bo'lgan oraliqda o'zgarganida FIK η ning o'zgarishi kam bo'ladi.

Ketma-ket qo'zg'atishli motorda mexanik va magnit isroflar yig'indisi valdagi yukka deyarli bog'liq bo'lmaydi. *Bu quyidagicha tushuntiriladi*. Tok I_a ning oshishi bilan magnit oqimi oshadi, bu esa aylanish chastotasi kamayishiga olib keladi, ya'ni *bir tomondan* magnit isroflar oshsa, *ikkinchidan*, aylanish chastotasining kamayishidan mexanik isroflar kamayadi; natijada ularning yig'indisi kam o'zgaradi. Shu sababdan ketma-ket qo'zg'atishli motorda FIK o'zining maksimal qiymatiga, xuddi parallel qo'zg'atishli motorlardagi singari, o'zgarmas isroflari (salt ishlash isroflari) o'zgaruvchan isroflarga (elektr isroflariga) teng ($P_0 = I^2_a R_a$) bo'lganda erishadi.

Ma'lumki, ish xarakteristikalari kuchlanishning $U = U_N = const$ qiymatida olinadi, shuning uchun O'TM ga berilayotgan elektr quvvati $P_1 = UI_a$ yuklama toki I_a ga mutanosib ravishda o'zgaradi. Demak, $P_1 = f(P_2)$ bog'liqlik boshqa masshtabda tokning o'zgarishi $I_a = f(P_2)$ ni ko'rsatadi.

d) Aralash qo'zg'atishli motorning ish xarakteristikalari.

Bunday motorda magnit oqimi $\Phi_{qo'z}$ parallel va ketma-ket qo'zg'atish chulg'amlari MYK larining birgalikdagi ta'siridan vujudga keltiriladi. Qo'zg'atish chulg'amlari MYK larining o'zaro nisbati shunday tanlanadiki, bunda bu chulg'amlardan bittasi mashina qo'zg'atish MYK ning 70 foizini vujudga keltirib, bu chulg'am *asosiy* hisoblanadi, ikkinchisi esa, *qo'shimcha* qo'zg'atish chulg'ami deyiladi. Qo'zg'atish chulg'amlarining o'zaro ulanishiga qarab ularni quyidagi turlarga ajratadilar:

1) *mos ulangan aralash qo'zg'atishli*, bunda parallel va ketma-ket qo'zg'atish chulg'amlari hosil qilgan MYK larining yo'nalishi bir xil bo'lib, ular qo'shiladi ($\Phi = \Phi_{Sh} + \Phi_c$).

2) *teskari ulangan aralash qo'zg'atishli*, bunda ketma-ket va parallel qo'zg'atish chulg'amlari MYK lari teskari yo'nalgan bo'lib, natijaviy oqim Φ yuklama toki oshishi bilan kamayadi ($\Phi = \Phi_{Sh} - \Phi_{c}$).

Mos ulangan aralash qo'zg'atishli motorlarning ish xarakteristikalari (31.6-rasm) parallel qo'zg'atishli motorning ish xarakteristikalariga yaqinlashadi.

Demak, aralash qo'zg'atishli motorning xarakteristikalari parallel va ketma-ket qo'zg'atishli motorlar xarakteristikalari oralig'ida joylashgan egri chiziqlardan iborat bo'lar ekan.

Aralash qo'zg'atishli motorda natijaviy magnit oqim $\Phi = \Phi_{Sh} \pm \Phi_{S}$ bo'lganligidan, uning momenti quyidagicha aniqlanadi:

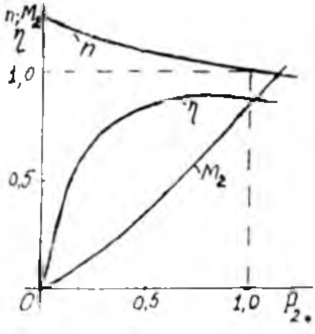
$$M = C_M\,(\Phi_{Sh} \pm \Phi_c) \cdot I_y\,, \qquad (31.19)$$

aylanish chastotasi esa:

$$n = (U - I_y \Sigma R_y) \,/\, [C_t(\Phi_{Sh} \pm \Phi_C)]. \qquad (31.20)$$

Qo'zg'atish chulg'amlari mos ulanganda yuklamaning oshishi bilan natijaviy oqim F oshadi, shuning uchun uning tezlik xarakteristikasi parallel qo'zg'atishli motorlarnikiga nisbatan pasayuvchan bo'ladi.

Agar qo'zg'atish chulg'amlari teskari ulansa, valdagi yukning oshishi bilan tok I_y oshadi va, demak, natijaviy oqim $\Phi = \Phi_{Sh} - \Phi_c$ kamayadi. Yuklamaning katta qiymatlarida oqim Φ ancha kamayib ketib, aylanish chastotasi n oshadi, natijada, agar M_{yu} = const va $U = U_N$ = const bo'lsa, tok I_y ning oshishiga olib keladi. Bu esa, o'z navbatida, motorning magnit oqimini yana ham kamaytirib, uning aylanish chastotasi yanada ko'proq oshishiga olib keladi va h.k. Amalda motorning yuklamasi 0 dan nominalgacha o'zgarib turadigan hollarda, uning aylanish chastotasini taxminan bir xil tutib turish lozim bo'lsa, ketma-ket qo'zg'atish chulg'ami asosiy (parallel) chulg'amga teskari qilib ulanadi.



31.6-rasm. *Mos ulangan aralash qo'zg'atishli motorning ish xarakteristikalari (asosiy chulg'am — parallel qo'zg'atishli, qo'shimcha chulg'am — ketma-ket qo'zg'atishli).*

31.4. O'zgarmas tok motorlarining mexanik xarakteristikalari

1) Parallel qo'zg'atishli O'TMining mexanik xarakteristikalari – $n = f(M_{em})$: kuchlanish $U_a = U_N$ = const, yakor zanjiridagi qarshilik R_a = const va qo'zg'atish zanjiridagi qarshilik $R_{qo'z}$ = const shartlar bajarilganda, motor valiga ulangan ish mexanizmining tormozlovchi momenti M_r ni ($M_t = M = M_0 + M_2$) o'zgartirib olinadigan aylanish chastotasi *n* ning o'zgarishini ifodalaydi. Mexanik xarakteristikani tahlil qilish uchun yakor zanjiriga ketma-ket ulangan R_r hisobga olgan holda (31.12) ifodani quyidagicha yozamiz:

$$n = [U - I_a(R_a + R_r)] / (C_E\Phi) =$$
$$= U/(C_E\Phi) - I_a(R_a + R_r) / (C_E\Phi) . \qquad (31.25)$$

Bunga $M = C_m I_a \Phi$ ifodadan aniqlangan tok I_a ning $[I_a = M/(C_m\Phi)]$ qiymatini qo'yib, hamda n = const bo'lganda $M = M_t$ bo'lishini e'tiborga olgan holda quyidagiga ega bo'lamiz:

$$n = U/(C_E\Phi) - M_t(R_a + R_r) / (C_E C_m \Phi^2) , \qquad (31.22)$$

bunda C_E, C_m, U va ($R_a + R_r$) lar o'zgarmas kattaliklardir.

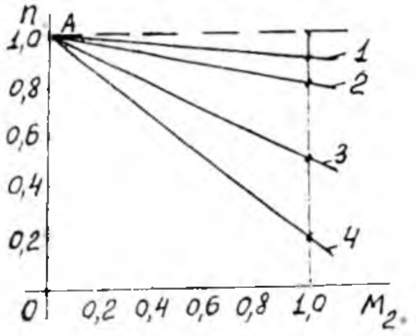
Shunday qilib, mexanik xarakteristikalarning o'zgarish shakli tezlik xarakteristikalarining shakliga o'xshagan bo'lib, O'TM ning magnit oqimi Φ, uning yuklama momenti M_{yu} ga bog'liq ravishda qanday o'zgarishiga, ya'ni mashinaning qo'zg'atilish usuliga bog'liq bo'ladi.

Parallel qo'zg'atishli motorda qo'zg'atish magnit oqimi $\Phi_{qo'z}$ ga yakor reaksiyasining ta'siri sezilarli bo'lmagani uchun, $\Phi_{qo'z}$ = const deb hisoblash mumkin. Agar O'TM ning turg'un rejimiga xos bo'lgan momentlar muvozanati tenglamasi ($M = M_0 + M_2$) dagi salt ishlash momenti $M_0 \approx 0$ deb, (31.22) ifodadagi M_t o'rniga M_2 ni qo'yib yozamiz:

$$n = U/(C_E\Phi) - M_2(R_a + R_r) / (C_E C_m \Phi^2) = n_0 - \Delta n, \qquad (31.23)$$

bu yerda $n_0 = U/(C_E\Phi)$ – O'TM ning salt ishlashidagi aylanish chastotasi (bunda qiymati juda ham kichikligidan $I_a R_a \approx 0$ deb qabul qilingan); $U/(C_E\Phi)$ va $1/(C_E C_m \Phi^2)$ – o'zgarmas kattaliklar; Δn – aylanish chastotasining kamayishi, bunga yakor zanjiri qarshiligi ($R_a + R_r$) va moment M_2 larning ta'siri sababchi bo'ladi.

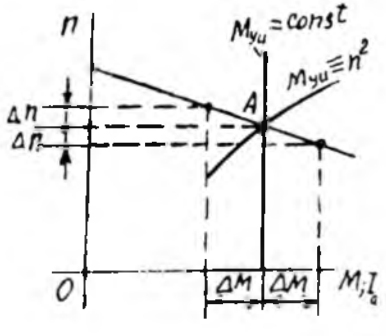
Agar reostatning qarshiligi R_r = 0 bo'lsa, tabiiy *mexanik xarakteristikaga* ega bo'lamiz. Bu xarakteristika absissalar o'qiga nisbatan ozgina og'gan to'g'ri chiziq bo'yicha o'zgaradi (31.7-rasm,1). Yakor zanjiriga qo'shimcha qarshilik kiritish bilan bu xarakteristikaning absissalar o'qiga nisbatan qiyalik burchagi oshadi (31.7-rasmda 2; 3; 4) va bu burchak R_r ning qiymatiga to'g'ri mutanosibda bo'ladi. Agar



31.7-rasm. *Parallel qo'zg'atishli O'TM ning mexanik xarakteristikalari.*

$I_a R_a \approx 0$ deb, u e'tiborga olinmasa, unda mexanik xarakteristikalari ordinatalar o'qidagi bitta A nuqtadan boshlanadi.

Parallel qo'zg'atishli motorning tezlik xarakteristikasi bilan uning mexanik xarakteristikasi o'rtasida uzviy bog'lanish mavjud. Hamma hollarda turg'un ishni ta'minlash uchun parallel qo'zg'atishli motorning pasayuvchi tezlik xarakteristikasiga uning pasayuvchi mexanik xarakteristikasi to'g'ri keladi.



31.8-rasm. *O'TM va ish mexanizmining turg'un ishlash shartlarini tushuntirishga oid mexanik xarakteristikalar.*

Parallel qo'zg'atishli motorning turg'unligi unga tegishli tezlik xarakteristikasining shakliga bog'liq bo'ladi. 31.8-rasmda M_{yu}= const (masalan, metall kesuvchi stanoklarda M_{yu} aylanish chastotasi n ga bog'liq emas) va $M_{yu} = n^2$ (ventilator, markazdan qochirma nasos, eshkakli vint va shunga o'xshashlarda) bo'lganda kamayuvchi aylanish chastota – $n = f(I_1)$ yoki mexanik – $n = f(M_2)$ xarakteristikalari ko'rsatilgan. Bu holda ham O'TMining turg'un ishlash sharti:

$$dM/dn < dM_{yu}/dn \quad (31.24)$$

bajariladi.

Umumiy hol uchun O'TM ning **turg'un ishlash sharti** quyidagicha xarakterlanadi: aylanish chastotasi oshganda aylantiruvchi momentning o'sishi dM, yukning valga hosil qilgan tormozlovchi momentining o'sishi dM_{yu} dan kam bo'lishi zarur.

Odatda, bu shartning bajarilishi uchun O'TMning aylanish chastotasi oshganda aylantiruvchi momentning kamayishi zarur bo'ladi (31.8-rasm). Shuning uchun parallel qo'zg'atishli motorning tezlik va mexanik xarakteristikalari pasayuvchi bo'lishi kerak.

Ketma-ket va aralash qo'zg'atishli motorlarning mexanik xarakteristikalari parallel qo'zg'atishli motordagi singari, $U= U_{N}=$ const va R_{r}=const bo'lgandagi $n = f\ (M_{2})$ bog'lanishni ifodalaydi. Mexanik xarakteristikaning ko'rinishi O'TMining yuk bilan ishlashidagi turg'unligini aniqlaydi.

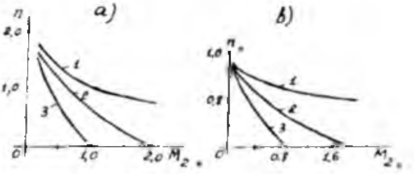
Normal sxema bo'yicha olingan tabiiy (1) va sun'iy (2 va 3) mexanik xarakteristikalar 31.9-rasmda ko'rsatilgan. *Magnit zanjiri to'yinmagan* ketma-ket qo'zg'atishli motorning mexanik xarakteristikasi tezlik xarakteristikasi (31.5-rasm) kabi giperbola shakliga o'xshab o'zgaradi. Haqiqatda esa, valdagi yukning o'zgarishi bilan ketma-ket qo'zg'atishli O'TM magnit zanjirining to'yinishi keng ko'lamda o'zgaradi. Shu sababli uning mexanik xarakteristikasini oddiy shakldagi matematik ifoda ko'rinishida faqat xususiy hol, ya'ni mashinaning magnit zanjiri to'yinmagan ($\Phi \equiv I_{a}$) hol uchun ifodalash mumkin. Bu holga (31.16) ifoda to'g'ri keladi.

Ketma-ket qo'zg'atishli motor keskin egri chiziqli kamayuvchi mexanik xarakteristikasiga ega bo'lganligidan uning validagi yuk (20÷25)% dan oshganda hamma vaqt turg'un ishlaydi.

Aralash qo'zg'atishli motorda ikkita qo'zg'atish chulg'ami mavjudligidan uning mexanik xarakteristikalari parallel va ketma-ket qo'zg'atishli motorlar mexanik xarakteristikalari orasidagi o'rinlarni egallaydi.

Magnit zanjiri to'yinganligi uchun aralash qo'zg'atishli motorlarning mexanik xarakteristikalarini, ketma-ket qo'zg'atishli motorlarniki singari, matematik jihatdan aniq va oddiy ko'rinishda ifodalab bo'lmaydi.

31.9,b-rasmda keltirilgan xarakteristikalardan ko'rinishicha, yakor zanjiriga ulangan qarshilik oshgan sari O'TM ning aylanish chastotasi pasayadi va bu holda xarakteristikalar tez kamayadigan bo'lib qoladi.



31.9-rasm. *Yakor zanjiriga ketma-ket ulangan reostat qarshiligi* R_r *ning har xil (1 −* $R_{r1}=0$*; 2 −* $R_{r2}=4$ *ra; 3 −* $R_{r3}= 9$ *ra) qiymatlarida ketma-ket qo'zg'atishli (a) va* $R_{r1}=0$ *(1);* $R_{r2}>R_{r1}$ *(2) va* $R_{r3}>R_{r2}$ *(3) qiymatlarida aralash qo'zg'atishli (b) motorlarning mexanik xarakteristikalari.*

31.5. O'zgarmas tok motorlarining rostlash xarakteristikalari

Dastlabki ma'lumotlar. O'TM lari nihoyatda xilma-xil va kerak tomonga o'zgartirila olinadigan rostlash xarakteristikalariga ega. Shu sababli bunday motorlar aylanish chastotasi keng ko'lamda o'zgaradigan qurilmalarda (masalan: metall jo'valaydigan katta dastgohda, elektr transportida va boshqa qurilmalarda) juda ham kerakli hisoblanadi.

O'TM ning rostlash xarakteristikalari uning aylanish chastotasini o'zgartirishdagi xususiyatlarini aniqlab beradi. Bu xususiyatlarga quyidagilar kiradi: 1) n_{max}/n_{min} nisbat bilan aniqlanadigan aylanish chastotani rostlash chegaralari; 2) elektr uskunasiga ketgan dastlabki xarajatlar va keyingi ishlatilish jarayonidagi chiqimlar nuqtayi nazardan aylanish chastotani rostlashning tejamliligi; 3) rostlashning xarakteri, ya'ni tekis yoki pog'onali ekanligi; 4) rostlash asbob-uskunasi va aylanish chastotani rostlash bo'yicha bajariladigan ishning soddaligi va ishonchliligi.

(31.4) tenglamani hisobga olgan holda O'TM EYK lar muvozanat tenglamasi (31.6)ga binoan quyidagi ifodani yozish mumkin:

$$n = [U - I_a (R_a + R_r)] / (C_E \Phi) \qquad (31.25)$$

bu yerda $\Phi = \Phi_{qo'z} - \Delta\Phi$; $\Delta\Phi$ − yakor reaksiyasining magnitsizlovchi ta'siri tufayli magnit oqimi kamayishining kattaligi; $R_a = r_a + r_c + r_{qo'sh.q} + r_{qo'z} + r_{ch}$ − yakor zanjiriga ketma-ket ulangan barcha chulg'amlarning va cho'tkalardagi o'tish qarshiligi (r_{ch}) ning yig'indisi.

(31.25) formuladan ko'rinishicha, O'TM larining aylanish chastotasini uchta usul bilan, ya'ni: 1) qo'zg'atish tokini o'zgartirish (bunda magnit oqimi $\Phi_{qo'z}$ o'zgaradi); 2) yakor chulg'ami zanjiriga ulangan reostat vositasida; 3) tarmoq kuchlanishi U ni o'zgartirish bilan rostlash mumkin ekan.

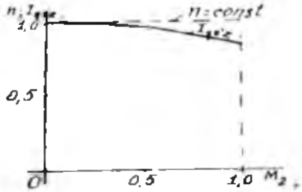
Parallel va mustaqil qo'zg'atishli motorlarning rostlash xarakteristikalari.

Parallel qo'zg'atishli motorning $n = n_N$= const va $U = U_{qo'z}$= const

bo'lgandagi rostlash xarakteristikasi – $I_{qo'z} = f(M_2)$. Shartga ko'ra, $U = U_{qo'z}$ = const bo'lganda magnit oqimi kam o'zgarganligidan parallel qo'zg'atishli motorning aylanish chastotasi *n* kam o'zgaradi. Shu sababli aylanish chastotasini n = const qilish uchun zarur bo'lgan qo'zg'atish toki $I_{qo'z}$ ning o'zgarishi ham kam bo'ladi (31.10-rasm).

O'TM validagi yuk momenti M_2 oshganda, aylanish chastotasini n = const qilish uchun, qo'zg'atish toki $I_{qo'z}$ ni kamaytirish zarur bo'ladi (bunda F ham kamayadi).

O'TMining aylanish chastotasini uning qo'zg'atish tokini o'zgartirish yo'li bilan rostlashda energiya isroflari juda ham kam bo'ladi, chunki qo'zg'atish toki $I_{qo'z}$ yakor toki I_a ning atigi bir necha foizini tashkil qiladi, xolos.



31.10-rasm. *Parallel qo'zg'atishli motorning $n = n_N$ = const va $U = U_N$ = const bo'lgandagi $I_{qo'z} = f(M_2)$ xarakteristikasi.*

Shunday qilib, O'TM aylanish chastotasini rostlashning ko'rib chiqilgan usuli ancha qulay bo'lib, u aylanish chastotani bir tekis, nihoyatda sodda va tejamli o'zgartirish imkoniyatini beradi. *Shu sababli bu usul amaldа keng qo'llaniladi.*

Yakor zanjiriga ketma-ket ulangan qarshilikni o'zgartirish yo'li bilan aylanish chastotasini rostlash. Bu holda yakorga beriladigan kuchlanish (U_a) reostatdagi kuchlanish pasayishi tufayli kamayadi.

EYK lar muvozanat tenglamasiga:

$$U_a - I_a R_a = E_a. \qquad (31.26)$$

asosan, yakor zanjiridagi kuchlanish pasayishi $I_a R_a$ yakor chulg'amining EYK E_a ni kamaytiradi. Magnit oqimining qiymati F = const bo'lganda bu EYK ning kamayishi aylanish chastotasi *n* ning kamayishi hisobiga sodir bo'ladi.

Biz tahlil qilib chiqqan usul bilan aylanish chastotasini kamayish tomonga keng ko'lamda o'zgartirish mumkin, lekin yakor zanjiriga ulangan rostlash reostatida energiya isroflari katta bo'lib, bu esa FIK ning kamayishiga olib keladi.

O'TM validan olinayotgan foydali (mexanik) quvvat, burchak aylanish chastota ω ga bog'liq bo'ladi: $P_2 = M_2 \omega$. Foydali moment M_2

$\approx M_{xu}$=const bo'lganda FIK quyidagi mutanosiblikka ega bo'ladi:

$$\eta = P_2 / P_1 = M_2\omega / (U_a I_a) \equiv \omega \equiv n . \qquad (31.27)$$

Bundan, FIK η aylanish chastotasi *n* ga to'g'ri mutanosibda bo'lar ekan, demak, aylanish chastotasi kamaygan sari, FIK η ham shuncha kam bo'lar ekan, degan xulosa kelib chiqadi. Shu sababdan yakor zanjiriga qarshilik ulash yo'li bilan aylanish chastotani rostlash usuli tejamli bo'lmaydi va bu usul amalda kam qo'llaniladi (masalan, elektr mikromotorlarida).

Yakor zanjirining uchlaridagi kuchlanishni o'zgartirish yo'li bilan motorning aylanish chastotasini rostlash. (31.12) tenglamaga asosan, O'TM larining aylanish chastotasi n taxminan unga berilayotgan kuchlanish U ga to'g'ri mutanosib ravishda o'zgaradi, deyish mumkin. Odatda, O'TM larining normal ish rejimi nominal kuchlanish U_N da kechib, uni kuchlanishning $U > U_N$ qiymatlarida ishlatish mumkin emas. Shu sababli ko'rilayotgan aylanish chastotani rostlash usuli kuchlanishning $U < U_N$ qiymatlarida o'zgartirishga imkon beradi. Bu usulni amalga oshirish uchun O'TM mustaqil O'T manbayi (masalan, O'T generatori)dan ta'minlanishi lozim bo'ladi. Bunday sistemaga generator-motor (G-M) sistemasi deyiladi. Generator esa birorta boshqa O'TM bilan aylantiriladi.

(G-M) sistemasi murakkab, uning tannarxi qimmat va energiya uch karra o'zgartirilganligi tufayli bu sistemaning FIK nisbatan kam (taxminan 0,6÷0,7) bo'lganligidan, so'nggi vaqtlarda O'T generatori o'rniga boshqariladigan to'g'rilagich (BT) qo'llanilib, masalan, prokat stanlarda BT-M sistemasi ishlatilmoqda.

Parallel qo'zg'atishli motorga beriladigan kuchlanishning har xil o'zgarmas (U = const) qiymatlaridagi uning tezlik xarakteristikalari $n = f(I_a)$ absissalar o'qiga parallel bo'lgan to'g'ri chiziqlardan iborat bo'ladi.

Ketma-ket qo'zg'atishli motorning rostlash xarakteristikalari

O'TMining aylanish chastotasini hisoblash formulasi – $n=(U - I_a R_a)/(C_I \Phi)$ *ga magnit zanjiri to'yinmagan hol uchun magnit oqimi* $\Phi = K_\Phi I_a$ *ni qo'yib aniqlangan*

$$n = U/ I_a - (\Sigma r_a + r_{s(a)})/ (C_E K_\Phi) \qquad (31.29)$$

tenglamadan ko'rinishicha, ketma-ket qo'zg'atishli motor aylanish chastotasini rostlash quyidagi, ya'ni: 1) yakor zanjiriga reostat ulash; 2) qo'zg'atish chulg'amini shuntlash, ya'ni bu chulg'amga parallel qilib

qarshilik ulash; 3) yakor chulg'amini shuntlash usullar bilan amalga oshirilishi mumkin.

Oxirgi ikkita usul, mohiyati jihatidan, O'TM aylanish chastotasi asosiy magnit oqimini (demak, qo'zg'atish tokini) o'zgartirish yo'li bilan rostlanishini ko'rsatib beradi.

Yakor zanjiriga ketma-ket ulangan reostat vositasida O'TM ning aylanish chastotasini rostlashda uning aylanish chastotasi *n* kamayadi. Bu usul tejamsizdir, chunki yakor zanjiriga ulangan reostatda qo'shimcha isroflar bo'ladi.

Aylanish chastotasi keng ko'lamda rostlanadigan ketma-ket qo'zg'atishli motorlar uchun yakor va qo'zg'atish chulg'amlarini qarshilik bilan shuntlash sxemasi qo'llaniladi.

Yakor chulg'amiga reostatni parallel ulash (shuntlash) yo'li bilan O'TMining aylanish chastotasini rostlash. Agar U=const va $M_{yu}=M=C_M \Phi I_a$ =const bo'lganda, faqat yakor qarshilik bilan shuntlansa, unda yakor toki I_a kamayadi, chunki yuklama tokining bir qismi ($I_{sh\ a}$) qarshilik (shunt) orqali o'tadi va liniyadagi yuklama toki bu ikkala tokning yig'indisidan ($I = I_a + +I_{sh\ a}$) iborat bo'ladi. Lekin shartga ko'ra, yakor chulg'ami shuntlanmasdan oldin va undan keyin ham aylantiruvchi moment bir xil qiymatga ega bo'lib qolishi kerak. Ammo yakorni shuntlashdan keyin yakor toki I_a kamayadi, bu holda, moment M_{yu} o'zgarmasligi uchun, qo'zg'atish chulg'amidagi tok $I_{qo'z}$ ning oshishi hisobiga oqim F ko'payishi lozim, demak, aylanish chastota *n* kamayadi (31.11-rasm, 2-egri chiziq).

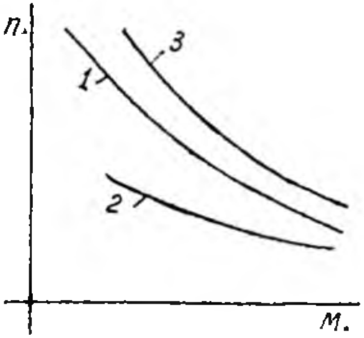
O'TM aylanish chastotasini bunday usul bilan rostlashda FIK η juda ham past, shu sababli bu usul cheklangan, ya'ni qisqa vaqt ichida O'TMining aylanish chastotasini keskin kamaytirish kerak bo'lgan hollarda (masalan, metallurgiya zavodining metall quyish sexlarida) foydalanadilar.

Bu usul yordamida aylanish chastotaning rostlash chegarasi taxminan 1: 5 gacha yetadi.

Qo'zg'atish chulg'amiga reostatni parallel ulash (shuntlash) yo'li bilan aylanish chastotasini rostlash. $U=U_N$ = const, n = const va M_{yu} = const bo'lgan ish rejimida qo'zg'atish chulg'amini

$R_{qo'z\ sh}$ qarshiligi (reostat) bilan shuntlanganda qo'zg'atish tokining bir qismi shunt orqali o'tadi. Shu sababli qo'zg'atish oqimi F kamayadi va O'TMning aylanish chastotasi *n* o'sadi (31.11-rasm, 3-egri chiziq). M_{yu}= const bo'lganligidan momentlarning muvozanat tenglamasiga

31.11-rasm. *Ketma-ket qo'zg'atishli motorning tezlik (mexanik) xarakteristikalari: 1 — shuntlanmagan normal hol; 2 — qo'zg'atish chulg'ami shuntlangan hol.*



asosan magnit oqimi F ning kamayishida yakor toki I_a ning qiymati shunchaga ko'payishi kerakki, bunda $M_{ch} = M = C_M \Phi I_a$ = const sharti bajarilsin. 31.11-rasmda ketma-ket qo'zg'atishli motorning *tabiiy mexanik xarakteristikasi* (1-egri chiziq) taqqoslash usullarining ahamiyatini belgilash uchun keltirilgan.

Qo'zg'atish chulg'ami va shuntlovchi reostatning qarshiliklari kam bo'lganligidan bu reostatdagi quvvat isroflari ham kam bo'ladi.

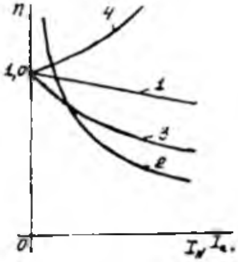
Shunday qilib, tahlil qilingan rostlash usuli ketma-ket qo'zg'atishli motorning aylanish chastotasini oshirishga imkon beradi, hamda bu usul juda ham tejamlidir. Bu usul ko'pincha tortish elektr motorlarida ishlatiladi.

Aralash qo'zg'atishli motorning rostlash xarakteristikalari

Parallel qo'zg'atish chulg'ami asosiy bo'lib, ketma-ket qo'zg'atish chulg'ami yordamchi bo'lgan aralash qo'zg'atishli motorda palallel qo'zg'atishli motorga xos bo'lgan rostlash usullari qo'llaniladi.

Qo'zg'atish chulg'amlari mos ulanganda (ularning MYK lari bir xil yo'nalgan hol), aralash qo'zg'atishli motorning tezlik

31.12-rasm. *Har xil qo'zg'atishli motorlarning tezlik xarakteristikalarini - n = f(Ia) taqqoslash: 1 — parallel; 2 — ketma-ket; 3 — mos ulangan aralash; 4 — teskari ulangan aralash.*



xarakteristikalari, parallel va ketma-ket qo'zg'atishli motorlarning tezlik xarakteristikalari oralig'ida joylashadilar. Shuning uchun 31.12-rasmda har xil qo'zg'atishli O'TM larining tezlik xarakteristikalari taqqoslangan.

31.6. O'zgarmas tok motorlari aylanish chastotasini rostlashning zamonaviy usullari

O'TM larida aylanish chastotasining rostlash quyidagi: 1) reostat-kontaktorli; 2) boshqariladigan to'g'rilagich-motor (BT-M) sistemasi vositasida; 3) impulsli rostlash usullar orqali amalga oshiriladi.

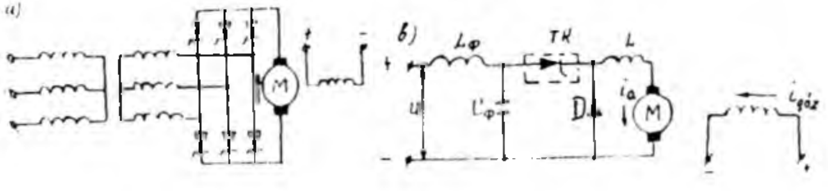
Rostlashning 1-usuli asosan kam va o'rta quvvatli elektr motorlarida keng qo'llaniladi. Reostat-kontaktorli boshqarishda:

a) aylanish chastotasi nominal qiymatidan kam talab qilingan ($n < n_N$) hollarda yakor zanjiriga qo'shimcha qarshilik ulab rostlanadi;

b) oshirilgan aylanish chastotalari ($n > n_N$) da qo'zg'atish tokini o'zgartirib rostlanadi.

Reostat-kontaktorli boshqarishni avtomatlashtirishning murakkabligi, ta'mirlash va ishlatishga katta chiqimlar talab qilinganidan, hozirgi vaqtda takomillashgan boshqarish sistemasi bilan almashtirilmoqda.

Tiristorlar asosida tayyorlangan boshqariladigan to'g'rilagichda bir vaqtning o'zida ham to'g'rilash, hamda to'g'rilangan kuchlanishni rostlash jarayoni amalga oshiriladi. Bu usulni amalda qo'llash natijasida hosil bo'lgan BT-M sistemasining FIK G-M sistemasinikiga nisbatan oshadi.



31.13-rasm. *Boshqariladigan to'g'rilagichdan ta'minlanadigan mustaqil qo'zg'atishli motorning aylanish chastotasini rostlash sxemasi (**a**) va o'zgarmas tok motorini impulsli rostlash (**b**):* $\alpha_f S_l$ *– kirish filtri (tozalagichi);* ***TK*** *– tiristorli kalit;* ***D*** *– teskari diod;* L_f *– induktivlik.*

Ko'rilayotgan usulning kamchiligi shundan iboratki, chiqish kuchlanishining kamaytirilgan qiymatlarida kirishdagi quvvat koeffitsienti cosφ pasayadi. Undan tashqari kuchlanishning

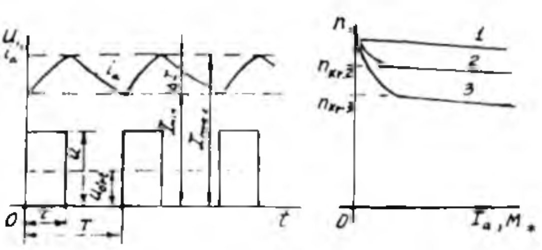
pulslanishidan tokning pulslanishi vujudga keladi va O'TM ning ishini yomonlashtiradi: quvvat isroflari oshadi, kommutatsiya jarayoni yomonlashadi va hokazo. Ayniqsa, to'g'rilagich bir fazali tok tarmog'idan energiya bilan ta'minlansa tokning pulslanishi katta bo'ladi. Shunga qaramasdan, *boshqa qator afzalliklari tufayli* hozirgi vaqtda O'TM ning aylanish chastotasini BT-M sistemasi bo'yicha rostlash amalda keng rivojlangan.

Hozirgi vaqtda O'TMlarining aylanish chastotasini *impulsli rostlash* amalda keng qo'llanilmoqda. Bunda O'TM ga impulsli uzgich vositasida davriy ma'lum chastotali kuchlanish impulslari beriladi.

Impulsli rostlash sxemasining (31.13,*b*-rasm) ishlash tartibi shundan iboratki, vaqtning τ davrida, ya'ni elektronli kalit (TK) ning yopiq paytida (bunga tranzistor yoki tiristorning ochiq holati to'g'ri keladi), kuchlanishning to'la qiymati O'TMining yakor chulg'amiga beriladi va bunda yakor tokining oniy qiymati oshadi (31.14,*a*-rasm). TK ochiq holda (demak, tranzistor yoki tiristor yopiq holda) esa, yakor toki birdaniga yo'q bo'lib qolmaydi, balki yakor zanjirining (L_a+L) induktivliklarida to'plangan elektromagnit energiyasi ta'siri ostida yakor zanjiri va teskari diod D orqali o'tadi va tok I_a ning qiymati kamayadi. Nominal rejimda impulslar ketma-ketlik chastotasi odatda (200 ÷ 400) Hz ni tashkil qiladi, shu sababli davr T, yakor zanjirining vaqt doimiyligidan taxminan 100 marta kam bo'ladi. Shuning uchun τ vaqt mobaynida impuls jarayonida yakordagi tok ko'p o'sishiga ulgurmaydi, tokning uzilgan vaqtida (T−τ) esa, tok I_a birdaniga kamayib ketishiga ulgurmaydi.

Yakor tokining o'zgarish egri chizig'ini tekislash maqsadida uning zanjiriga filtr (tozalagich $-L_1S_1$) ulanadi. Bu holda yakor zanjirining uchlaridagi kuchlanish, amaliy jihatdan o'zgarmas bo'lib qoladi va

31.14-rasm. *O'TM ning aylanish chastotasini impulsli rostlashda kuchlanish va toklarning o'zgarish grafigi (**a**) va parallel qo'zg'atishli motorni impulsli rostlashda tezlik va mexanik xarakteristikalari (**b**).*



tiristorning ulanib turgan vaqtini, butun sikl davomida ketgan vaqtga nisbatan chiqqan songa to'g'ri mutanosibda bo'ladi.

Yakor chulg'amiga beriladigan kuchlanishning o'rtacha qiymati

$$U_a = U_{o'rt} = U \cdot \tau / T = \alpha U, \qquad (31.30)$$

bu yerda $\alpha = \tau / TT$ – kuchlanishni rostlash koeffitsienti (bu koeffitsient elektron kalit TK ning nisbiy ulanish davomiyligiga teng).

Bunda O'TMining aylanish chastotasi

$$n = (\alpha U - I_a \cdot \Sigma R_a) / (C_E \Phi), \qquad (31.31)$$

bu yerda $I_a = I_{o'rt}$ – yakor tokining o'rtacha qiymati.

Yakor tokining pulslanishi ΔI (5÷10)% dan oshmagan ish rejimda yakor chulg'amiga beriladigan kuchlanishning har xil qiymatlarida olingan O'TM ning tezlik va mexanik xarakteristikalari (31.14-rasm, 1, 2 va 3), O'T manbasidan O'TMiga beriluvchi kuchlanish U ni o'zgartirib olingan xuddi shunday xarakteristikalariga o'xshash bo'ladi.

Parallel qo'zg'atishli O'TMining yuki kamayganda yakor tokining pulslanishi oshadi va biror kritik yuklamada pulslanib keladigan toklar ish rejimi boshlanadi. Yakor toki $I_a=0$ bo'lganda $E_a=U$ bo'lganligidan ideal salt ishlashdagi aylanish chastotasi $n = U / (C_E \Phi)$ vaqt τ ga ya'ni kuchlanishni rostlash koeffitsienti α ga bog'liq emas. Shu tufayli elektr motori pulslanib keladigan toklar bilan ishlash rejimiga o'tgandan keyin, qandaydir kritik aylanish chastotada (n_{kr}), tezlik va mexanik xarakteristikalarning absissalar o'qiga nisbatan og'ish burchagi keskin o'zgaradi (31.16-rasmda – boshlang'ich qismi). Aylanish chastotaning $n_0 > n > n_{kr}$ o'zgarish chegarasida esa, bu xarakteristikalar xuddi, yakor zanjiriga reostat ulash yo'li bilan aylanish chastotasini rostlashdagi o'zgarish shakliga o'xshaydi.

Aylanish chastotasining kritik qiymati quyidagiga teng:

$$n_{kr} = n_0 \cdot (e^{\alpha\beta} - 1) / (e^{\beta} - 1), \qquad (31.32)$$

bu yerda $\beta = T/T_a$; $T_a = (L + L_a) / \Sigma R_a$ – yakor chulg'ami zanjirining vaqt doimiysi.

O'TMiga beriladigan kuchlanishning o'rtacha qiymati $U_{o'rt}$ elektron kalit TK ga (τ = const bo'lganda) beriluvchi boshqarish impulslarining berilish davri T ning davomiyligini o'zgartirish (***chastotali-impulsli rostlash***) yo'li bilan, yoki davr T ning o'zgarmas qiymatida vaqt τ ni o'zgartirish (***impuls kengligini rostlash***) yo'li bilan rostlanadi. *Qurama*

rostlashdan ham foydalaniladilar, bunda ham davr T ni, hamda vaqt τ ni birgalikda o'zgartiradilar. Shunday qilib, impulsli uslub, O'TM aylanish chastotasini kuchlanishi o'zgarmas bo'lgan manbadan ta'minlanganda uning yakor zanjiri reostatsiz bo'lsa ham, keng chegarada rostlashga imkon beradi. Bunda qo'shimcha isroflar deyarli bo'lmaydi.

Nazorat savollari:

1. O'TM ning tuzilishi va ishlash prinsipini gapirib bering.

2. Parallel qo'zg'atishli O'TM ni "reostatli" ishga tushirish jarayonidagi tok, moment va aylanish chastotalarning o'zgarish xarakteri qanday?

3. Nima uchun ketma-ket qo'zg'atishli O'TM ni yuksiz ishga tushirib bo'lmaydi?

4. Parallel qo'zg'atishli O'TM ning ish xarakteristikalarini tahlil qilib bering.

5. O'TM va ish mexanizmining turg'un ishlash sharti nima bilan xarakterlanadi?

6. O'TM larining aylanish chastotasini rostlash usullari nimalardan iborat?

7. O'TM lari aylanish chastotasini rostlashning zamonaviy usullari qanday?

32-BOB. MAXSUS MAQSADLI VA ZAMONAVIY O'ZGARMAS TOK MASHINALARINING AYRIM TURLARI

Maxsus maqsadli O'T mashinasining unipolyar (qutblari bir nomli) va magnitogidrodinamik turlari ham mavjud bo'lib, ular tor sohalar uchun mo'ljallanishini ta'kidlash bilan chegaralanib mazkur bobda maxsus maqsadli o'zgarmas tok mashinalarining amalda keng qo'llaniladigan hamda istiqbolli turlariga oid ma'lumotlar keltirilgan.

32.1. O'zgarmas tok taxogeneratorlari

O'T taxogeneratorlari konstruksiyasi va ishlash prinsipi bo'yicha mustaqil elektromagnit qo'zg'atishli yoki qo'zg'atish maydoni doimiy magnit bilan hosil qilinadigan kam quvvatli kollektorli O'T mashinalaridir (32.1-rasm). Ular chiqish klemmalaridagi kuchlanish kattaligiga qarab aylanish chastotasini o'lchash uchun hamda avtomatik nazorat qilish va rostlash sxemalarida valning aylanish chastotasiga mutanosib bo'lgan elektr signallari olish uchun xizmat qiladi.

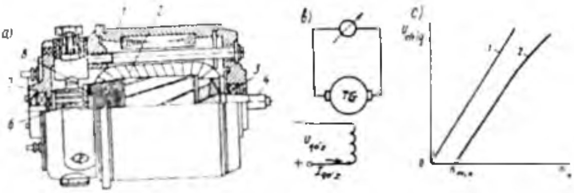
Qo'zg'atish toki o'zgarmas, ya'ni magnit oqim Φ = const bo'lganda taxogeneratorning chiqish klemmalaridagi EYK E_{chiq} aylanish chastotasi *n* ga to'g'ri mutanosib ravishda o'zgaradi:

$$E_{chiq} = C_E \Phi \cdot n. \qquad (32.1)$$

Bu formula magnit oqimi F = const bo'lgan doimiy magnitlar bilan qo'zg'atiladigan taxogeneratorlar uchun ham to'g'ri keladi. Uning chiqish kuchlanishi:

$$U = E_a - I_a \Sigma R_a = E_a - U (\Sigma R_a / R_{yu}), \qquad (32.2)$$

bu yerda R_{yu} – yuklama (elektr o'lchash asbobi)ning qarshiligi.



32.1-rasm. *O'zgarmas tok taxogeneratorining tuzilishi (**a**), prinsipial shemasi (**b**) va uning chiqish xarakteristikasi (c).*

Birorta mexanizmning aylanish chastotasini o'lchash uchun taxogeneratorning valini mexanizm vali bilan mexanik ravishda birlashtiriladi. Taxogeneratorning chiqish xarakteristikasi F = const va ΣR_a= const bo'lganda olinadi va ishining aniqlik darajasi mazkur

xarakteristikaning to'g'ri chiziqli o'zgarishiga bog'liq bo'ladi, lekin amalda chiqish xarakteristikasi — $U_{chiq}=f(n)$ yakor reaksiyasi va cho'tkalar kontaktida kuchlanish tushishi tufayli to'g'ri chiziqli bo'lmaydi, undan tashqari cho'tka kontaktidagi kuchlanish tushishi sababli u koordinata o'qlari boshidan chiqmay, n_{min} aylanish chastotadan keyingina $U_{chiq} > 0$ bo'ladi (32.1,*b*-rasm, 2).

Qarshiligi katta bo'lgan o'lchov asboblarini ishlatish bilan chiqish xarakteristikasining o'zgarishini to'g'ri chiziqliga yaqinlashtirib taxogeneratorning aniqlik darajasi oshiriladi. Yakor reaksiyasining ta'sirini kamaytirish maqsadida mashinaning magnit zanjirini to'yinmagan yoki nihoyatda to'yingan qilib loyihalanadi.

Zamonaviy O'T taxogeneratorlari chiqish xarakteristikalarining tikligi $S = 3 \div 100$ mV/(ayl/min) bo'ladi (kam qiymatlar doimiy magnit bilan qo'zg'atiladigan taxogeneratorlarga xosdir).

Aylanish chastota $n = 0$ dan n_{min} gacha oshganda $U_{chiq} = 0$ bo'lgan oraliqni ***nosezgirlik zona*** deyiladi va chegarasi quyidagicha aniqlanadi (32.1,*b*-rasm):

$$n_{min} = \Delta U_{chiq} / (C_E \Phi). \qquad (32.3)$$

Asosiy magnit maydoni doimiy magnit bilan hosil qilinadigan o'zgarmas tok taxogeneratorlari mustaqil O'T manbasi talab qilinmaganligi, konstruksiyasining oddiyligi va gabaritlarining kichikligi tufayli ular amalda keng qo'llanilmoqda.

32.2. Ijrochi o'zgarmas tok motorlari

Ijrochi O'TM lari (32.2-rasm) elektr signallarni mexanik harakatga aylantirish uchun mo'ljallangan. Bunday motorlar kam inersiyali, ya'ni boshqarish O'TM ni tezkorlik bilan mexanik harakatga oshiradigan bo'lishi lozim. Odatdagi konstruksiyali O'TM larida yakor o'zagining mavjudligi yakorning inersiya momentini ancha orttiradi. Shu sababli ijrochi O'TM lar pazsiz yakorli va yakori bosma chulg'amli qilib tayyorlanadi.

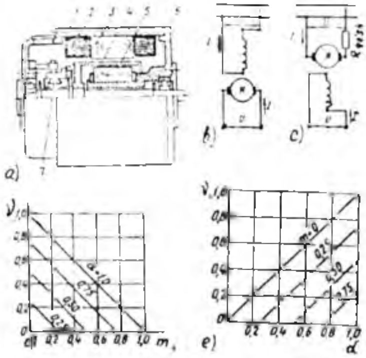
Umumiy maqsadli O'TM lariga qo'yiladigan talablardan tashqari ijrochi O'TM lariga boshqarish signalining uzilishi bilan o'z harakatini darhol to'xtatishi va inersiyasining kamligi kabi maxsus talablar qo'yiladi.

Elektromagnit qo'zg'atishli ijrochi O'TM larining ikkita chulg'ami bo'lib, ulardan bittasi elektr tarmog'iga doimiy ulanib, uni *qo'zg'atish chulg'ami* deyiladi. Valning aylanishi zarur bo'lgan holda ikkinchi chulg'amga, ya'ni ***boshqarish chulg'amiga*** elektr signali beriladi.

Ijrochi O‘TMilarining konstruksiyasi umumiy maqsadli O‘TM larinikidan *quyidagilar bilan farq qiladi*, ya'ni ularning yakori, staninasi va qutblari yupqa elektrotexnik po‘lat tunukalaridan yig‘ilgan bo‘ladi, chunki bunday motorlarning ishi ko‘pchilik hollarda o‘tish jarayonlar bilan bog‘liq bo‘ladi. Ijrochi motorlarning magnit zanjiri to‘yinmagan bo‘ladi, shu sababli uning ish xarakteristikalariga yakor reaksiyasi deyarli ta'sir qilmaydi.

Mustaqil qo‘zg‘atishli ijrochi motorlarning ikkita usul bilan, va'ni yakordan va qutbdan boshqarish mumkin. Xarakteristikalari chiziqli bo‘lganligi va elektr signali uzilganda yakor tezkorlik bilan to‘xtash qobiliyatiga egaligi kabi afzalliklari mavjudligidan *yakordan boshqariladigan* ijrochi O‘TM lari (32.2,*b*-rasm) amalda keng qo‘llaniladi.

Bularda qo‘zg‘atish chulg‘ami motorning butun ish jarayonida elektr tarmog‘iga ulangan bo‘ladi. Yakor chulg‘ami esa *boshqarish chulg‘ami* deyiladi. Bu chulg‘amga boshqarish signalini berganda yakor chulg‘amidan o‘tadigan tok qo‘zg‘atish chulg‘ami magnit maydoni bilan ta'sirlashib, aylantiruvchi moment hosil qilishi natijasida yakor aylanadi.



32.2-rasm. *Ijrochi o‘zgarmas tok motorining umumiy ko‘rinishi (**a**) (bunda: 1 — korpus; 2 — qo‘zg‘atish chulg‘ami; 3 — qutb; 4 — ichi kavak yakor; 5 — ferromagnit o‘zak; 6 — podshipnikli qalqon; 7 — kollektor); yakordan (**b**) va qutbdan (**c**) boshqariladigani; yakordan boshqariladigan ijrochi motorning mexanik (**d**) va rostlash (**e**) xarakteristikalari.*

Ijrochi motor inersiyasini kamaytirish maqsadida quyma ferromagnit o‘zak *ichki stator* deb nomlanadigan qo‘zg‘almas qismda joylashgan bo‘lib, yakor chulg‘ami esa silindrik karkasga plastmassa bilan quyib mahkamlanadi. Demak, yakor chulg‘ami o‘tkazgichlari plastmassa bilan mahkamlangan silindrsimon kavak idishdan iborat bo‘lar ekan.

Ichi kavak yakorning inersiya momenti odatdagi yakornikidan ancha kamligi tufayli motorning *yaxshi tezkorlikka egaligi uning afzalligi* bo‘lsa, qo‘zg‘atish chulg‘ami joylashgan o‘zak (tashqi stator) va qo‘zg‘almas

ferromagnit o'zak (ichki stator) orasida *katta nomagnit oraliqqa egaligi* magnit qarshilikni oshirib zaruriy maydon hosil qilish uchun qo'zg'atish MYK ni ancha oshirish talab etilishi (demak, motor gabaritining nisbatan oshishi) esa *ularning kamchiligidir*.

Bunday motorlarning FIK taxminan odatdagi konstruksiyali O'TMilarniki singari bo'ladi, asosiy maydoni doimiy magnit qo'llab hosil qilinadigan motorlarda esa FIK yana ham yuqori bo'ladi.

32.3. O'zgarmas tok mashinalarining zamonaviy turlari

a) Kontaksiz (ventilli) o'zgarmas tok motorlari.

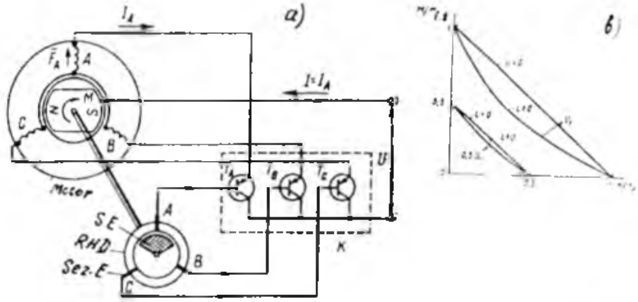
Ma'lumki, odatdagi O'TM larining asosiy kamchiligi — cho'tka-kollektor qurilmasining ishdagi ishonchliligining kamligidir. O'TM larining ish xossalarini yaxshilash maqsadida ularning cho'tka-kollektor qurilmasi yarim o'tkazgichli kommutator (invertor) bilan almashtirilgan. Bu kommutator kontaksiz rotor holati datchigidan kiradigan signallar orqali boshqariladi. Motorning ishchi chulg'ami (bir-biridan fazoda 120° siljigan va "yulduz" ulangan A, B va C chulg'amlari) stator o'zagi pazlarida joylashtirilgan, rotori esa doimiy magnitdan yasalgan (32.3-rasm).

Birorta mexanizmni harakatga keltirayotgan motorning vali rotor holati datchigi (RHD) bilan mexanik ravishda birlashtirilgan bo'ladi. RHDning rotorida signal elementi (SE), statorida esa sezgir elementi (Sez.E) o'rnatiladi. Bundan keladigan signal kommutator bloki (KB)ga kiradi. Yakor chulg'ami seksiyalarining O'T manbasiga ulanishi KB elementlari orqali amalga oshiriladi.

RHD ning vazifasi — doimiy magnit qutblarining yakor chulg'ami seksiyalariga nisbatan tutgan holatiga mos holda boshqarish signalini KB ga berishdan iboratdir. RHD ning sezgir elementi sifatida asosan Xoll EYK datchigi qo'llaniladi. Bu datchikning chiqishidagi signal zanjirdagi tokning yo'nalishi va qo'zg'atish chulg'ami magnit maydonining yo'nalishiga mutanosib ravishda o'zgaradi.

Statik kommutator RHD dan boshqarish signalini olib motorning yakor chulg'amida xuddi kollektor bilan cho'tka yakor chulg'amida hosil qiladigan toklarning o'zgarishini vujudga keltiradi.

Kommutator (K) — har fazaviy chulg'amga bittadan T_A, T_B, T_C tranzistordan iborat bo'lib, A, B, C fazaviy chulg'amlarga ketma-ket ulangan. Tranzistorlarga beriladigan boshqarish signallar Sez.E ning holatiga bog'liq ravishda ishlab chiqiladi. Tranzistorlar kalit rejimida



32.3-rasm. *Kontaktsiz (ventilli) o'zgarmas tok motorining prinsipial sxemasi (**a**) va mexanik xarakteristikalari (**b**): **SE** – signal elementi; **RHD** – rotor holatining datchigi (darakchisi); **Sez.E** – sezgir element; **K** – yarimo'tkazgichli kommutator; **T** –tranzistor.*

ishlab "yopiq" yoki "ochiq" turg'un holatiga ega. *Birinchisi* signal yo'q vaqtiga to'g'ri keladi, *ikkinchisi* esa signal berilganda bo'ladi. 32.3-rasmda Sez.E statorning "A" fazasiga mos kelgan holati ko'rsatilgan. Bunda T_A– ochiq, ya'ni "A" fazasidan tok I_A o'tadi, T_V va T_S lar esa yopiq bo'ladi. I_A toki rotorning doimiy magnit maydoni bilan ta'sirlashib aylantiruvchi moment M ni hosil qiladi. Natijada, rotor RHD bilan soat strelkasi bo'yicha aylana boshlaydi. Biroz vaqtdan keyin SezE birdaniga ikkita fazaga ta'sir eta boshlaydi, so'ngra esa "B" fazasi ishlaydi va hokazo. Kontaksiz O'TM lari shu tarzda ishlaydi. Ularning mexanik xarakteristikalari 32.3,*b*-rasmda keltirilgan.

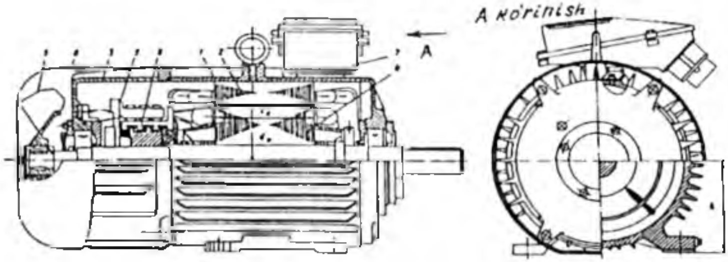
Kontaksiz O'TM lari odatdagi motorlarning ijobiy sifatlarini saqlagan holda, ularda cho'tka-kollektor qismining yo'qligi *ularning katta afzalligidir*. Konstruksiyasi (motor, RHD va kommutator) ning murakkabligi va narxining qimmatligi *ularning kamchiligidir*.

b) O'zgarmas tok mashinalarining texnik-iqtisodiy ko'rsatkichlari yaxshilangan yangi seriyalari.

Hozirgi vaqtda umumiy maqsadli O'T mashinalarining asosiy seriyalari 2P va 4P, hamda kran-metallurgiya motorlari va maxsus maqsadli seriyalari ishlab chiqarilmoqda. 2P seriyasiga quvvati 0,13 dan 200 kW gacha, aylanish o'qi balandligi 90÷135 mm bo'lgan motorlar kiradi. Ilgarigi P seriyaga kiradigan XII÷XVI gabaritlar yangi P2 seriya bilan almashtirilmoqda.

O'T mashinasining 4P yangi seriyasi ishlab chiqilgan. Bu seriyadagi mashinalarning texnik-iqtisodiy ko'rsatkichlari yaxshilangan va uning ayrim qismlari va detallari 4A seriyadagi asinxron motorlarniki bilan moslashtirilgan, ya'ni unifikatsiya qilingan (32.4-rasm).

4P seriyadagi o'rta va katta quvvatli O'T mashinalari tarqalgan kompensatsion chulg'am bilan ta'minlangan. Stator va yakor magnit o'tkazgichlari yupqa elektrotexnik po'lat tunukalardan yig'iladi. Mazkur seriyadagi bir qator mashinalarning statori asinxron motorlarnikiga o'xshagan bo'lib namoyon qutbli bo'ladi (32.4-rasm). Qo'zg'atish va kompensatsion chulg'amlari pazlarga bir tekis tarqatilgan. Statorni bunday konstruksiyada bajarish asinxron motorlar statorlarini ishlab chiqarish texnologiyasidan keng foydalanish maqsadida amalga oshiriladi, ya'ni O'TM lari statorlarini tayyorlash uchun alohida maxsus stanoklar talab etilmaydi.



32.4-rasm. *4PO seriyali o'zgarmas tok motorining bo'ylama va ko'ndalang qirqimlari:*

***1** – korpus; **2** – stator magnit o'tkazgichi; **3** – old tomondagi podshipnik qalqoni; **4** – yakor po'lat o'zagi; **5** – ventilator; **6** – himoya qoplamasi (kojuxi); 7 – chulg'am uchlari chiqarilgan quticha; **8** – kollektor; **9** – cho'tka tutqich; **h** – rotorning aylanish o'qi balandligi;* d_a *– yakor diametri;* l_a *– yakor uzunligi.*

O'TM larining 2P va 4P seriyalarining motorlari 110, 220, 340 va 440 V kuchlanishlarga va 750, 1000, 1500, 2200 va 3000 ayl/min aylanish chastotalarga tayyorlanadi.

2P seriyali motorlar mustaqil qo'zg'atishli bo'lib, qisqa muddatli katta o'ta yuklanishni ta'minlaydigan kompensatsion chulg'amga ega va ularning aylanish chastotasini keng ko'lamda o'zgartirish mumkin.

Metallurgiya, yuk ko'tarish kranlar, ekskavatorlar va boshqa elektr

yuritmalar uchun quvvati 2,5 dan 185 kW gacha, kuchlanishi 220 va 440 V, n_N =400–1440 ayl/min bo'lgan "D" seriyali O'TM lar (ular aylanish chastotani keng ko'lamda rostlashni ta'minlaydi);

qadamlovchi ekskavatorlar elektr yuritmalari uchun quvvati 450 kW, 370 V, n = 29 ayl/min bo'lgan MPVE–450–29 tipli; quvvati 1000 kW, 600 V, n = 630/1000 ayl/min bo'lgan MPE–1000–630 UXLZ tipli O'TM lari; quvvati 1250 kW, kuchlanishi 930 V, aylanish chastotasi 1000 ayl/min bo'lgan GPE–1250 tipli O'T generatorlari;

burg'ilovchi qurilmalar uchun quvvati 68 kW bo'lgan DEV–808 tipli, 110 t yuk ko'taradigan BelAZ–7519 o'zi ag'darar yuk mashinasi g'ildiragini aylantiruvchi tortish O'TM lari (360 kW, U = 750 V, n = 1100 ayl/min) va ularni energiya bilan ta'minlovchi GPA-600 tipli (630 kW) generator;

elektrovoz va teplovozlar uchun quvvati 8000 kW gacha bo'lgan tortish O'TM lari;

jo'valash dastgohlari (prokat stanlari) uchun quvvati 30000 kW gacha bo'lgan O'TM lari (ikki, uch va to'rt yakorli konstruksiyada);

kam quvvatli O'TM lar PL, DPM, DPR seriyalarda ishlab chiqarilmoqda.

Nazorat savollari:

1. Taxogeneratorning tuzilishi va ishlash prinsipini gapirib bering.

2. Ijrochi O'TM qanday ishlaydi, afzalligi va kamchiligi nimalardan iborat?

3. Ventilli O'TM ning tuzilishi va ishlash prinsipini gapirib bering.

4. Texnik-iqtisodiy ko'rsatkichlari yaxshilangan O'TM larining yangi seriyalari to'g'risida ma'lumot bering.

VI BO'LIM. ELEKTR MASHINALARI UCHUN UMUMIY BO'LGAN MASALALAR

33-BOB. ELEKTR MASHINALARI VA TRANSFORMATORLAR AKTIV QISMLARINI TAYYORLASHDA QO'LLANILADIGAN ASOSIY MATERIALLAR. ELEKTR MASHINALARIDA MAGNIT ZANJIRLAR

33.1. Magnit materiallar

Elektr mashinalarining ish xossalari va ishonchliligi ko'p jihatdan ular tayyorlangan magnit, elektr o'tkazuvchi va elektr izolatsiya materiallarining xossa va sifatlariga bog'liq.

Transformator va EM lari magnit sistemasini tayyorlashda sovuqlayin jo'valangan anizotropli po'lat (markalari 3411—3414, 3404—3408) plastinalari va tunukalarini, uning jo'valanish yo'nalishi asosiy magnit oqimi yo'nalishi bilan mos tushadigan qilib joylashtiriladi.

Po'latni ishlab chiqarish jarayonida tarkibiga 0,5 dan 4,8 % gacha kremniy qo'shilsa, uning magnit singdiruvchanligi oshadi va gisterezis tufayli bo'ladigan quvvat isroflari kamayadi; solishtirma elektr qarshiligi oshishi tufayli uyurma toklar hosil qiladigan quvvat isroflari pasayadi. Anizotropli po'latning solishtirma isroflari issiqlayin jo'valangan turiga nisbatan 2÷2,5 marta pastdir.

Po'lat jo'valanishining bo'ylama va ko'ndalang yo'nalishlarida ham magnit xossalari yaxshi bo'lgan "kub shaklli" tuzilmaga ega bo'lgan sovuq holatda jo'valangan izotropli elektrotexnik po'latlar istiqbolli hisoblanib, ulardan EM lari magnit sistemasini tayyorlashda ham keng foydalanishga imkon beradi.

33.2. Elektr o'tkazuvchi, o'ta o'tkazuvchan va krioo'tkazgich materiallar

Elektr o'tkazuvchanligi yaxshi bo'lganligidan EM lari va transformatorlarda yaxshi tozalangan M0 (99,5 % Cu) va M1 (99,9 % Cu) markali mis va aralashmalardan tozalangan AE (99,5 % Al) markali aluminiy keng qo'llanilmoqda.

Zichligining kamligi, erish temperaturasining pastligi, yuqori

egiluvchanligi hamda zanglashdan himoya qiluvchi mustahkam va juda yupqa oksid pardasiga egaligi *aluminiyning muhim xossalari* hisoblanib, uning mexanik jihatdan mustahkamligi misnikiga nisbatan ancha yomonligi *uning kamchiligidir*. Misning elektr o'tkazuvchanligi aluminiynikiga nisbatan taxminan *1,6 marta yuqori* bo'lganligi uchun mis materiali chulg'amlarni tayyorlashda keng ishlatiladi.

Yuqori qizishga chidamli o'rov simlariga ularning PNSDK va PNSDKT markalari kiradi. Temperaturaga bog'liq holda bu simlar izolatsiyasining xizmat muddati o'zgaradi. Masalan, 250°C da xizmat muddati 15000÷20000 soatlargacha, 400°C da esa, u 200÷500 soatlargacha yetadi, xolos.

Temperaturaning o'sishi bilan mis va aluminiy solishtirma elektr qarshiliklarining oshishi *ularning kamchiligi* hisoblanadi.

Asinxron motorning rotor pazlariga qisqa tutashgan chulg'amni quyish uchun qarshiligi oshirilgan AKZ, AKM, AKTs qotishmalari qo'llaniladi. O'T mashinasining kollektor plastinalarini tayyorlash uchun tarkibiga kadmiy qotishtirilgan qattiq holda jo'valanib tortilgan mis qo'llaniladi. Bunda misning mexanik mustahkamligi oshadi va kollektorning yeyilishi kamayadi.

Asinxron motor rotorining qisqa tutashgan chulg'amini va sinxron mashinaning so'ndirgich (dempfer) chulg'amini tayyorlash uchun latun (misning rux bilan qotishmasi) va bronza (misning qalay, kadmiy, berilliy va fosforlar bilan qotishmasi) qo'llaniladi.

O'ta o'tkazgichlar – o'ta o'tkazuvchanlik hodisasi tufayli, absolut nolga yaqin (4,2 K) temperaturagacha sovitilganda o'ta o'tkazgich materialning o'zgarmas tokka nisbatan qarshiligi va materialdan tok o'tganda ichki magnit maydonni siqib chiqarish xususiyatlariga ega bo'lgan holatiga asoslangan elektr o'tkazgichdir.

Kelajakda niobiy-qalay (Nb–Sn) qotishmasidan tayyorlangan o'ta o'tkazgichni amalda qo'llash istiqbolli hisoblanadi, chunki uni ancha kuchli magnit maydonlarda ham ishlatish mumkin.

Krioo'tkazgichlar – bu tozalangan metalldan yasalgan o'tkazgichlar chuqur sovitilgan holatda foydalanilganda yuksak elektr o'tkazuvchanlikka ega bo'lsa ham o'ta o'tkazuvchanlik holatga o'tmaydi.

O'ta o'tkazgich va krioo'tkazgichlarni elektr mashinasozlikda qo'llash odatdagi EM lariga va transformatorlarga nisbatan (bir xil quvvatda) ularning gabaritlari va massasini keskin kamaytirishga hamda ularning FIK ni oshirishga imkon beradi. Bu esa katta iqtisodiy samaradir.

Ayrim mamlakatlar (Shveysariya, Yaponiya, AQSH, Xitoy va Rossiya) da azotning suyuqlikka aylanish temperaturasi (−196)°C dan oshgan qiymatlarda ham o'ta o'tkazuvchanlik xossasiga ega bo'lgan materiallar ixtiro qilingan.

O'ta o'tkazuvchan materialni olish uchun suyuqlantirilgan geliyning o'rniga suyuq azot ishlatilsa, kriogen davri (tsikli)ning samarasi 10 martadan ham ko'p oshadi. Agar azotni havodan olib suyuqlantirish suyuq geliyni olishga nisbatan 20 marta arzon ekanligi hisobga olinsa, bu samaraning salmog'i yana ham anchaga oshadi.

33.3. Elektr izolatsiya materiallari

Bu izolatsiyalarga: qizishga chidamlilik, yuksak elektr va mexanik mustahkamlik, namga bardoshlik, yaxshi issiq o'tkazuvchanlik va egiluvchanlik *kabi asosiy talablar qo'yiladi.*

Izolatsiyaning *qizishga chidamliligi* ishning *ishonchliligini aniqlovchi asosiy talabidir.* EM sining normal ish sharoitlardagi xizmat muddati 15÷20 yil bo'lishi kerak, bu esa, asosan izolatsiyaning xizmat muddati bilan aniqlanadi. Agar izolatsiya standartda belgilangan me'yoriy temperaturadan taxminan 8÷10°C ga oshirilgan sharoitda ishlatilsa, o'zining izolatsion xossasi va mexanik mustahkamligini yo'qotishi tufayli, EM ning xizmat muddati 2 marta kamayadi,

Elektr mashinasozligida va transformatorsozlikda qo'llaniladigan elektr izolatsiya materiallarini qizishga chidamlilik xossasi bo'yicha yettita klassga bo'linadi (izolatsiyani qavs ichida ko'rsatilgan temperaturagacha davomli ishlatish mumkin):

1) Y (80 °C) klassiga: paxta, tabiiy ipak, selluloza, plastmassa va boshqa sintetik materiallar kiradi. *Ular asosan ayrim elektr apparatlarida qo'llaniladi.*

2) A (105 °C) klassiga: getinaks, tekstolit, loklangan mato, elektrokarton, transformator moyi, kapron, emal izolatsiyalar va boshqalar kiradi. *Bu klassdagi izolatsiya materiallari asosan transformatorsozlikda qo'llaniladi.*

3) E (120 °C) klassiga: emal, epoksid smola (qatron), lavsan va boshqa sintetik materiallar kiradi. *Ular asosan kam quvvatli EM larda qo'llaniladi.*

4) B (130 °C) klassiga: mikanit, mikalenta, asbest va shisha tola materiallar kiradi. *Ular o'rta va katta quvvatli EM larni tayyorlashda keng qo'llaniladi.*

5) F (155 °C) klassiga: organik lok va kremniy organik smolalar qotishmasiga shimdirilgan slyuda, asbest va shisha tolalar asosidagi materiallar kiradi. *Ular o'rta va katta quvvatli EM larini tayyorlashda keng ishlatiladi.*

6) H (180 °C) klassiga: kremniyorganik smolalarga shimdirilgan slyuda, asbest va shisha tolalar asosidagi materiallar kiradi. *Ular og'ir sharoitda (konchilik va metallurgiya sanoatlarida, transportda va boshq.) ishlatiladigan maxsus EM larini tayyorlashda qo'llaniladi.*

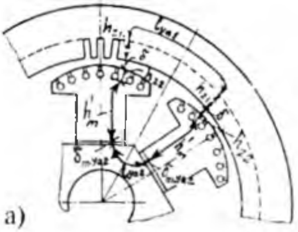
7) C (180 °C dan yuqori) klassiga: slyuda, asbest, shisha, kvars, farfor, shisha tolali materiallar kiradi. Ular *EM lari va tranformatorlarning maxsus maqsadli turlarini tayyorlashda ishlatiladi.*

Zamonaviy EM larining ko'pchiligida V va F klassdagi materiallar asosida tayyorlangan izolatsiyalar qo'llaniladi. Bunday EM larida kompozitsion elektr izolatsiya materiallari ham keng qo'llanilmoqda. Mazkur materiallar sintetik tola asosida tayyorlanadigan har xil egiluvchan izolatsiya materiallari bilan polimer yupqa pardalarning birikmasidan hosil qilinadi.

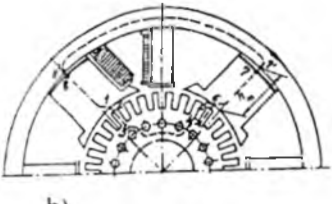
33.4. Elektr mashinalarining magnit zanjiri va uni hisoblash tartibi

Elektr mashinaning magnit zanjiri uning konstruksiyasiga bog'liq holda havo oralig'i va po'lat qismlaridan iborat bo'ladi.

Ayon qutbli sinxron mashinalar va o'zgarmas tok mashinalarida magnit zanjirni quyidagi qismlardan iborat (*O'T mashinasi uchun qavs ichida raqamlar orqali belgilangan*), ya'ni: havo oralig'i dd 2 ta ("1−2" va "5−6"), 2 ta qutb osti "effektiv havo oralig'i" $dd_{(m\ va2)}$ (bu oraliqlar faqat katta quvvatli ayon qutbli SM lar uchun), kompensatsion chulg'ami bo'lmagan an'anaviy konstruksiyali O'T mashinalarida yakor o'zagi tish qatlami balandligi h_z 2 ta ("2−3" va "4−5") [kompensatsion chulg'amli O'T mashinasida esa qo'shimcha ravishda magnit zanjirning mazkur chulg'am joylashgan qismidagi (33.1,*s*-rasm) tish qatlamining balandligi h_{z1} 2 ta], 2 ta qutbning o'zaklari h'_m ("1−8" va "6−7"), katta quvvatli ayon qutbli O'T mashinasi qutb o'zaklarining stator yarmosi bilan tutashtirilgan joydagi magnit qarshilikni hisobga olish uchun ishlatiladigan 2 ta ("7−7′" va "8−8′") "effektiv havo oraliq − $dd_{(m.va1)}$" hamda stator ("7′−8′") va rotor ("3−4") yarmolaridan iborat deb qaraladi (33.1,b-rasm).

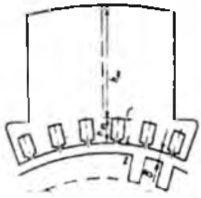


a)



b)

33.1-rasm. *Katta quvvatli ayon qutbli sinxron mashinaning (**a**) va kompensatsion chulg'amsiz ayon qutbli o'zgarmas tok mashinasining (**b**) magnit zanjirlari; katta quvvatli O'T mashinasi bosh qutb uchligida joylashtiriladigan kompensatsion chulg'am uchun pazlar (**d**).*



d)

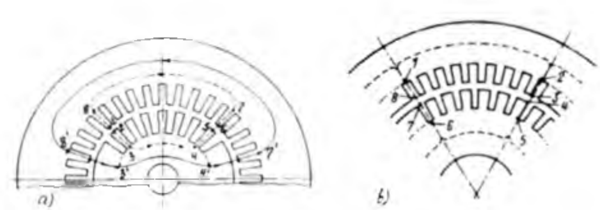
Noayon qutbli sinxron va asinxron mashinalar hamda statorining konstruksiyasi asinxron motorlarniki bilan moslashtirilgan ***O'T mashinalari*** magnit sistemasida odatdagidek *qutb o'zaklari (bunday noayon qutbli O'T mashinasida qo'zg'atish chug'ami stator pazlarida joylashtiriladi) va* magnit zanjirning kompensatsion chulg'ami uchun tish qatlami *bo'lmaydi.*

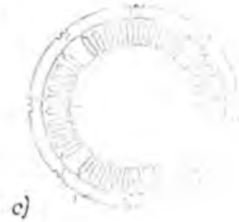
Noayon qutbli sinxron mashina (*ikki qutbli turbogenerator*)ning magnit zanjiri: ("1—2" va "5—6") — havo oraliq, ("2—3" va "4—5") — rotor po'lat o'zagining tish qatlami, ("1—8" va "6—7") — stator po'lat o'zagining tish qatlami, ("3—4; 3'—4'" va "7—8; 7'—8'") — tegishlicha rotor va stator yarmolaridan iboratdir (33.2,*a*-rasm).

To'rt qutbli asinxron va O'T mashinalarining magnit zanjiri 33.2,*b*-rasmda ko'rsatilgan, ya'ni: ("3—4" va "7—8") — havo oraliq; ("4—5" va "6—7") — rotor (O'T mashinalari uchun yakor) po'lat o'zagining tish qatlami; ("1—8" va "2—3") — stator (O'T mashinalari stator pazlarida tarqalgan holdagi qo'zg'atish chulg'ami pazlari qismi) tishli qatlami; ("1—2" va "5—6") — tegishlicha rotor (yakor) va stator yarmolaridan iborat.

Magnit oqimning kattaligi MYK $F_{qo'z}$ ga to'g'ri mutanosibda bo'lib, magnit zanjiri barcha qismlarining magnit qarshiliklari yig'indisi R_m ga esa teskari mutanosibda bo'ladi:

$$\Phi_0 = F_{qo'z} / R_m \,. \qquad (33.1)$$





33.2-rasm. *Ikki qutbli turbogenerator (**a**), to'rt qutbli asinxron va noayon qutbli O'T mashinalarining (**b**) magnit zanjirlari;* **c** *— O'T mashinasi statori po'lat o'zagining listi (tunukasining shakli), bunda: 1 — bosh qutb; 2 — qo'shimcha qutb; 3 — stator (qo'zg'atish va kompensatsion) chulg'amlarini tarqalgan holda joylashtirish uchun pazlar.*

O'zgaruvchan va O'T mashinalari magnit zanjirini hisoblash ***to'la tok qonuniga*** asoslangan ***bir xil metodikada*** amalga oshiriladi. 33.1-rasmda ko'rsatilgan juft qutb uchun bu qonun quyidagicha ifodalanadi:

$$F_{qo'z} = \oint H dl = 2w_{qo'z} I_{qo'z}, \qquad (33.2)$$

bunda: $F_{qo'z}$, $I_{qo'z}$ — tegishlicha qo'zg'atish chulg'amining MYK va toki; $w_{qo'z}$ — qo'zg'atish chulg'amining bitta qutbdagi o'ramlar soni; H — magnit maydon kuchlanganligi; *l* — integrallash konturi (zanjiri)ning uzunligi.

Bu holda *to'la tok qonuni quyidagicha ifodalanadi*, ya'ni:

a) katta quvvatli ayon qutbli sinxron mashina uchun

$$F_{qo'z(0)} = F_\delta + F_{Z2} + F_{qo'z\,m} + F_{\delta(m\,ya2)} + F_{ya2} + F_{Z1} + F_{ya1}, \quad (33.3)$$

b) kompensatsion chulg'amsiz ayon qutbli O'T mashinasi uchun

$$F_{qo'z(0)} = F_\delta + F_{qo'z\,m} + F_{\delta(m\,ya1)} + F_{ya1} + F_{Z2} + F_{ya2}, \qquad (33.4)$$

bu yerda $F_{qo'z(0)}$ — qo'zg'atish chulg'amining bir juft qutbga mos keladigan MYK (magnit zanjirining tarkibiy qismlaridagi magnit kuchlanishlarini muvozanatlaydi).

Magnit zanjiri qismlarining magnit kuchlanishlariga: F_δ — mashina havo oralig'i, $F_{\delta(m\,ya2)}$ — qutb osti "effektiv havo oralig'i", F_{Z1} — ayon qutbli SM larda stator tishli qatlami yoki kompensatsion chulg'amli

an'anaviy konstruksiyali O'T mashinalarda qutb uchligi tishli qatlami, F_{Z2} — ayon qutbli SM lar qutb uchligi pazlarida joylashgan tinchlantiruvchi (yoki ishga tushiruvchi) chulg'am pazlari tufayli hosil bo'lgan tishli qatlami va $F_{qo'z.m}$ — qutb o'zaklarining hamda F_{ya1} va F_{ya2} — tegishlicha, stator va rotor yarmolarining magnit kuchlanishlari kiradi.

Magnit zanjirining ketma-ket keladigan har bir qismi uchun magnit kuchlanish umumiy holda quyidagicha ifodalanadi:

$$F_i = H_i l_i , \qquad (33.5)$$

bunda: H_i — mazkur qismdagi magnit maydon kuchlanganligining o'rtacha qiymati; l_i — hisoblanadigan qismning o'rtacha uzunligi.

Bu holda (33.3) formula umumiy hol uchun quyidagicha yoziladi:

$$F_{qo'z(0)} = 2H_\delta \cdot \delta + 2H_{Z2} h_{Z2} + 2H_{qo'z.m} \cdot h_{qo'z.m} + 2H_{\delta(m\ va\ 2)} \cdot \delta_{(m\ va\ 2)} + H_{ya2} \cdot l_{ya2} + 2H_{Z1} h_{Z1} + H_{ya1} \cdot l_{ya1} = 2 \cdot w_{qo'z} \cdot I_{qo'z}. \qquad (33.6)$$

Magnit o'tkazgichi to'yingan holda EMsi magnit zanjiri tarkibidagi ikkita havo oraliqning magnit kuchlanishi qo'zg'atish chulg'ami MYK tarkibining asosiy (60÷80 %) qismini tashkil qiladi.

EMsi magnit zanjirini hisoblashda havo oraliqdagi induksiya Vd_d ga me'yoriy qiymat berib magnit oqimni hisoblagandan keyin magnit zanjirning boshqa tarkibiy qismlari uchun induksiya hisoblanadi. Bundan keyin mazkur qismlarga tegishli po'lat markasiga oid jadvallar bo'yicha har bir qism uchun magnit maydon kuchlanganligi aniqlanadi.

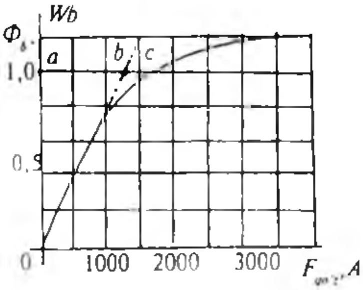
Magnit zanjirining tarkibiy qismlari MYK larini o'zaro qo'shib uning to'la toki, ya'ni magnit qarshiligini muvozanatlovchi MYK topiladi:

$$\Sigma F = I_{qo'z} \cdot w_{qo'z} = F_{qo'z} . \qquad (33.7)$$

Mazkur MYK ni havo oraliq magnit induksiyasi Vd_d ning bir necha qiymatlari uchun hisoblab, so'ngra mashinaning magnitlanish (yoki magnit) xarak-teristikasi — $F_\delta = f(F_{qo'z})$ quriladi (33.3-rasm).

Magnit oqimi osha borgan sari magnit zanjir po'lat qismlarining magnit qarshiligini ham yengish uchun MYK ning qiymati oshadi (33.3-rasmda, "*bc*" oraliq).

EMsini loyihalaganda havo oraliqdagi magnit oqimning nominal qiymati $F_{\delta N}$ ga mos keladigan ishchi nuqtani EM magnit xarakteristikasining egilgan qismiga to'g'ri keladigan qilib tanlanadi. Bu egilish magnit zanjirning to'yinish koeffitsienti k_m ga bog'liq bo'ladi.



33.3-rasm. *O'zgarmas tok mashinasining magnit xarakteristikasi.*

Magnit oqimi F, ma'lum bo'lganda bu koeffitsientni magnitlanish xarakteristikasidan aniqlash mumkin, ya'ni $k_m = bc / av$. Bu koeffitsient EMsi havo oralig'i uzunligi va magnit zanjirining to'yinish darajasiga bog'liq bo'ladi.

Sinxron va aylanish chastotasi n>1000 ayl/min bo'lgan O'T mashinalarida $k_m = 1,1 \div 1,3$ (nominal aylanish chastotasi nisbatan kam va uni magnit oqimi vositasida ko'p karra rostlanadigan O'T mashinalarida $k_m = 1,4 \div 1,8$); asinxron mashinalarda esa – $k_m = 1,2 \div 1,6$.

Nazorat savollar:i

1. Elektr mashinaning magnit sistemasi qanday materialdan tayyorlanadi?

2. Elektr mashinaning magnit zanjiri qanday tartibda hisoblanadi?

3. O'ta o'tkazgich va krioo'tkazgich materiallar to'g'risida ma'lumot bering.

4. Transformatorlarda qanday markali elektr izolatsiya materiali qo'llaniladi?

34-BOB. ELEKTR MASHINALARI VA TRANSFORMATORLARDA QUVVAT ISROFLARI HAMDA ULARNING FOYDALI ISH KOEFFITSIENTI. ELEKTR MASHINALARINING QIZISHI VA ULARNI SOVITISH

34.1. Elektr mashinalarida va transformatorlarda quvvat isroflari

Elektr mashinalarida quvvat isroflari. Elektr mashina (EM) larida elektr energiyaning mexanik energiyaga yoki mexanik energiyaning elektr energiyaga aylanishida energiyaning bir qismi issiqlik energiyaga aylanib isrof bo'ladi va EM ning qismlarini qizdiradi, shu sababli ularning foydali quvvati unga berilgan quvvatdan kam.

Aylanuvchi qismli EM larida isroflarni ***asosiy*** va ***qo'shimcha*** turlarga bo'lib o'rganiladi (I z o h: *Mazkur kitobda aktiv quvvat belgisi R dan farqli bo'lishi uchun quvvat isroflari P ' bilan belgilangan*).

Asosiy isroflarga: EM magnit sistemasining qayta magnitlanishidan uning asosiy qismlarida uyurma toklar ($P'_{uyur} \equiv (f \cdot B_{max} \cdot \Delta)^2$, bunda Δ – po'lat listining qalinligi) va gisterezis hodisasi tufayli ($P'_{gis} \sim f \cdot B^2_{max}$) hosil bo'lib, issiqlikka aylanadigan **magnit isroflar (P'_m)**, EM ning chulg'amlarida va cho'tka kontaktlarida elektr energiyaning issiqlikka aylanib sarflanadigan elektr isroflar; EM aylanuvchi qismlarining havoga urilib ishqalanishi, podshipniklardagi ishqalanish, sirpanuvchi kontaktlardagi va ventilatordagi ishqalanishlar tufayli hosil bo'ladigan **mexanik isroflar (P'_{mex})** kiradi. Mexanik isroflar faqat rotorning aylanish chastotasiga bog'liq bo'ladi. Quvvati 10÷500 kW bo'lgan O'T mashinalarida mexanik isroflar EM nominal quvvatining tegishlicha 2÷0,5 foizini tashkil qiladi.

O'zgaruvchan tok mashinalari po'lat o'zagidagi asosiy isroflar berilgan kuchlanishning kvadrati (U^2)ga mutanosib ravishda o'zgaradi.

Elektr isroflar. EMining har qaysi chulg'am o'tkazgichlaridan tok o'tganda tokning kvadratiga va chulg'am qarshiligiga mutanosib bo'lgan asosiy quvvat isroflari ($P'_e = I^2 \cdot r$) vujudga keladi.

Chulg'am qarshiligi uning temperaturasiga bog'liq bo'ladi. Agar biror ϑ_0 temperaturada chulg'am qarshiligi r_0 ma'lum bo'lsa, uni EMining hisobiy ishchi temperaturasi ϑ ga quyidagicha qayta hisoblanadi:

a) $r_{75} = r_0[1 + \alpha(75 - \vartheta_0)]$; b) $r_{115} = r_0\,[1 + \alpha(115 - \vartheta_0)]$, (34.1)
bu yerda $\alpha \approx 0{,}004$ – misning temperatura koeffitsienti.

Chulg'amlarning elektr isroflarini aniqlashda standart tavsiyasiga binoan chulg'am izolatsiyasining A, E va B issiqlikka chidamlilik klasslari uchun 75°C, F va H klasslari uchun esa 115°C hisobiy ishchi temperaturada isroflar aniqlanishi zarur.

O'zgaruvchan tok mashinasi chulg'amlarining o'tkazgichlaridan tok o'tganda vujudga keladigan elektr isroflari quyidagicha aniqlanadi:

a) stator chulg'amida

$$P'_{e1} = m_1\, I_1^2\, r_1; \qquad (34.2)$$

b) asinxron motorning rotor chulg'amida

$$P'_{e2} = m_2 I_2 \cdot r_2 = m_1 (I'_2)^2 \cdot r'_2 . \qquad (34.3)$$

(34.2) va (34.3) formulalarda stator va rotor chulg'amlarining, tegishlicha: m_1, m_2 – fazalar soni; I_1, I_2 – toklari; r_1, r_2 – aktiv qarshiliklari; I'_2, r'_2 – rotor chulg'ami toki va aktiv qarshiligining stator chulg'amiga keltirilgan hisobiy qiymatlari;

d) mustaqil qo'zg'atishli chulg'amda (sinxron va O'T mashinalarida)

$$P'_{qo'z\,(mus)} = I^2_{qo'z} \cdot r_{qo'z}; \qquad (34.4)$$

e) O'T mashinasi parallel qo'zg'atish chulg'amida

$$P'_{qo'z\,(par)} = I_{qo'z} \cdot U_a ; \qquad (34.5)$$

f) O'T mashinasi yakor zanjirida

$$P'_{e.a} = I_a^2 \cdot \Sigma r_a, \qquad (34.6)$$

bunda $\Sigma r_i = r_a + r_{qo'sh.q} + r_c + r_k$ – yakor zanjiridagi ketma-ket ulangan (r_a – yakor chulg'ami, $r_{qo'sh.q}$ – qo'shimcha qutb chulg'ami, r_c – ketma-ket qo'zg'atish chulg'ami, r_k – kompensatsion chulg'ami) qarshiliklarining ishchi temperaturadagi qiymatlari yig'indisi.

EM sining to'la elektr isroflari, masalan, O'T mashinalari uchun quyidagiga teng bo'ladi:

$$\Sigma P'_e = P'_{e.a} + P'_{qo'z} + P'_{ch} , \qquad (34.7)$$

bunda $P'_{e.a}$, $P'_{qo'z}$ – tegishlicha yakor zanjiri va qo'zg'atish chulg'amlaridagi isroflar; $P'_{ch} = 2\,\Delta U_{ch} \cdot I_a$ – cho'tka kontaktlarida vujudga keladigan elektr isroflar ($\Delta U_{ch} \approx 0{,}5 \div 1{,}0$ V – bitta cho'tka kontaktidagi kuchlanish tushishi);

Qo'shimcha isroflar. Bu isroflar EM ga yuklama ulanganda har xil ikkilamchi hodisalar tufayli sodir bo'ladi. Masalan, odatdagi O'T mashinalarida ko'ndalang yakor reaksiyasi ta'sirida qutb uchligi chekkalarida va uning ro'parasidagi yakor o'zagi tishlarida magnit oqimining notekis taqsimlanishi magnit isroflarni oshirsa, sirt effekti natijasida o'tkazgichlarda tokning notekis taksimlanishi esa elektr isroflarni oshiradi. EM lari magnit o'zagining tishliligi tufayli magnit oqim katta chastota ($f_t = Z \cdot n / 60$) bilan pulslanadi. Natijada po'lat o'zagida sirtiy va pulsatsion isroflar vujudga keladi.

Qo'shimcha isroflar tabiatining murakkabligi tufayli umumiy maqsadli EM lari uchun amaliyotdan aniqlangan ma'lumotlarga binoan EM nominal quvvatining 0,5 ÷ 1,0 foizi miqdorida (masalan, O'T mashinalarining nominal yuklamadagi qo'shimcha isroflari kompensatsion chulg'ami bo'lmagan EM larida nominal quvvatining 1,0 % ga, bunday chulg'amli EM larda esa 0,5 foiziga teng, deb hisoblanadi.

EM laridagi to'la quvvat isroflari quyidagiga teng bo'ladi:

$$\sum P' = P'_{m} + \sum P'_{e} + P'_{mex} + P'_{qo'sh} \qquad (34.8)$$

Misol tariqasida quvvati 500 kW, kuchlanishi 460 V va aylanish chastotasi 375 ayl/min bo'lgan O'T generatorining nominal yuklamadagi quvvat isroflari 55,8 %, magnit isroflari 23,3 %, mexanik isroflari 8,2 % va qo'shimcha isroflari 12,7 % tashkil qilishini ko'rsatish mumkin.

Transformatorlarda quvvat isroflari. Bularga o'zgaruvchan magnit oqimning o'zakda hosil qilgan magnit isroflari ($R'_m = R'_0$) va chulg'amlarining o'tkazgichlaridan tok o'tganda Joul-Lens qonuniga binoan vujudga keladigan elektr (R'_e) isroflari (shu jumladan qo'shimcha isroflari ham) kiradi:

$$\sum P' = P'_0 + K^2_{yu} P'_e \qquad (34.9)$$

Transformatorga berilgan kuchlanish U_1= const va uning yuklamasi salt ishlashdan nominalgacha bo'lgan qiymatlarda magnit oqim deyarli o'zgarmas bo'lganligidan transformatorning magnit isroflari ham o'zgarmas bo'ladi. Bu isroflar salt ishlash isroflariga taxminan teng ($P'_m \approx P'_0$) bo'ladi.

Asosiy va qo'shimcha elektr isroflari tokning kvadratiga mutanosib ravishda o'zgaradi. Ularni nominal tokda olingan qisqa tutashuv isroflari orqali ifodalash o'ng'ay bo'ladi:

$$P'_e = (I_2 / I_{2N})^2 P'_{qt.N} = K^2_{yu} P'_{qt.N} \qquad (34.10)$$

Elektr mashinalarining foydali ish koeffitsienti.

Har qanday mexanizm va EMining foydali ish koeffitsienti η foydali quvvat P_2 ning berilgan quvvati P_1 ga nisbati orqali aniqlanadi:

$$\eta = P_2 / P_1 = P_2 / (P_2 + \sum P') . \qquad (34.11)$$

Elektr motorlarida: R_{1M} – iste'mol qiladigan (tarmoqdan oladigan) elektr quvvat (O'T mashinalarida $P_{1M} = U \cdot I$, o'zgaruvchan tok mashinalarida esa – $P_{1M} = \sqrt{3}\ U \cdot I \cdot \cos\varphi$); $P_{2M} = M_2 \omega = 0{,}105\ M_2 \cdot n$ – val orqali mexanizm va dastgohlarga uzatiladigan mexanik quvvat (bunda M_2 – elektr motorining foydali momenti, N·m; n – aylanish chastotasi, ayl / min).

Elektr generatorlarida: P_{2G} – foydali quvvat, ya'ni generatorning tarmoqqa beradigan elektr quvvati (o'zgaruvchan tok mashinalarida – $P_2 = mU_f \cdot I_f \cdot \cos\varphi$, O'T mashinalarida esa – $P_2 = U \cdot I$); $P_{1G} = M_1 \omega = 0.105\ M_1 n$ – generatorning valiga beriladigan mexanik quvvat (bunda M_1 – birlamchi motorning aylantiruvchi momenti, N·m; n – aylanish chastotasi, ayl/min).

Standart (GOST 11828-86) tavsiyasiga binoan foydali ish koeffitsientlari $\eta \geq 0.7$ bo'lgan EM lari uchun oldin tajriba yo'li bilan quvvat isroflari yig'indisi $\sum P'$ aniqlanib, FIK η quyidagicha hisoblanadi:

a) *elektr motorlari* iste'mol qiladigan elektr quvvat (P_1)ni aniq o'lchab olish oson bo'lganligidan uning FIK ni hisoblash formulasi quyidagicha yoziladi:

$$\eta_M = (P_1 - \sum P') / P_1 = 1 - (\sum P') / P_1 ; \qquad (34.12)$$

b) generatorlarning foydali, ya'ni elektr quvvati P_{2G} ni o'lchash qulay bo'lganligidan uning FIK quyidagicha hisoblanadi:

$$\eta_G = P_{2G} / (P_{2G} + \sum P') = 1 - (\sum P') / (P_{2G} + \sum P'). \qquad (34.13)$$

Zamonaviy EM larining FIK katta qiymatga ega. EM lari nominal quvvatining oshishi bilan ularning FIK ham kattalashadi. Ularning FIK quvvatiga bog'liq holda taxminan quyidagi qiymatlarga ega bo'ladi:

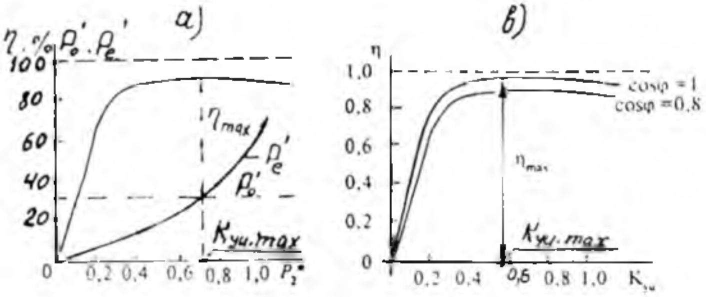
a) quvvati bir necha ming kW va undan katta bo'lgan EM larida FIK $\eta = 95 \div 98{,}94$ foizga yetadi. Masalan, O'zbekistonda (Qashqadaryo vil.) qurilayotgan Tolimarjon IES da o'rnatilgan va kelajakda o'rnatiladigan har bittasining quvvati 800 MW bo'lgan turbogeneratorda esa $\eta = 98{,}8$ %; b) birnecha yuz kW bo'lgan EM larida – $88 \div 92$ %; d) taxminan 10 kW bo'lgan EM larida – $83 \div 88$ %; e) birnecha 10 W gacha bo'lgan elektr mikromashinalarida esa $\eta = 30 \div 40$ foizdan iborat.

EM larida (transformatorlarda ham) o'zgaruvchan isroflar ($k^2_{yu} P'_e$)

o'zgarmas isroflar (P'_0) ga teng bo'lganda FIK maksimum η_{max} ga erishadi (qavs ichida transformator uchun):

$$P'_0 = K^2_{yu} P'_e \text{ (yoki } P'_{0.N} = K^2_{yu} P'_{qt.N}\text{)};\qquad (34.14)$$

bu holda K_{yu} quyidagiga teng bo'ladi:



34.1-rasm. *Elektr mashinalarida o'zgarmas (P'_0) va o'zgaruvchan (P'_e) isroflar hamda FIK(h) ning yuklama (aktiv quvvat)ga nisbatan o'zgarishi (**a**); transformator uchun $\eta = f(K_{yu})$ bog'liqlik– yuklamaga va unung xarakteriga mos holda $P'_0 / P'_{qt} = 0,3$ uchun keltirilgan(**b**).*

$$K_{yu} = \sqrt{P'_0 / P'_e} \text{ (yoki } K_{yu.max} = \sqrt{P'_{0N} / P'_{qtN}}\text{)}.\qquad (34.15)$$

FIK ning foydali quvvatga nisbatan o'zgarishi $\eta = f(P_2)$ 34.1.b-rasmda ko'rsatilgan. Yuklama koeffitsienti osha borgan sari $P'_e = K_{yu} P_{2N}$ oshadi.

Yuklama koeffitsienti $K_{yu} \approx 0,25$ da uning kvadrati (K^2_{yu}) ga mutanosib ravishda o'zgaradigan chulg'amlardagi isroflar juda tez o'sishi tufayli R_2 va η larning o'sishi sekinlashadi.

FIK maksimumga erishgandan keyin elektr isroflari va qo'shimcha isroflar foydali quvvatga nisbatan tezroq o'sishi tufayli η sekin kamaya boshlaydi. Umuman, $\eta = f(P_2)$ bog'liqlikning $\eta < \eta_{max}$ bo'lgan qismida o'zgarmas isroflar (P'_0) o'zgaruvchan isroflardan katta bo'lib, $\eta > \eta_{max}$ bo'lgan qismida esa o'zgaruvchan isroflar (P'_2) o'zgarmas isroflardan katta bo'ladi.

EM larni loyihalashda uning eng ko'p ishlaydigan vaqtidagi isroflar nisbati (P'_0 / P'_e) η_{max} ga to'g'ri keladigan qilib tanlanadi.

Zamonaviy EM larida FIK ning maksimal qiymati yuklama koeffitsientining $k_{yu} = 0,6 \div 0,7$ qiymatlariga to'g'ri keladi, chunki EM larini amalda ishlatish jarayonida uning yuklamasi ko'pchilik hollarda

o'zgarib turadi va nominaldan kam bo'ladi.

Transformatorlarning foydali ish koeffitsienti.

(34.11) formulaga quyidagicha o'zgartirish kiritib:

$$\eta=P_2/(P_2+\sum P')=(P_2+\sum P'-\sum P')/(P_2+\sum P') \qquad (34.16)$$

FIK ni aniqlashning boshqa ko'rinishdagi formulasiga ega bo'lamiz:

$$\eta=1-\sum P' \,/\, (P_2+\sum P'). \qquad (34.17)$$

Salt ishlashdan nominal yuklamagacha bo'lgan oraliqda ikkilamchi chulg'am kuchlanishi kam o'zgaradi, shu sababli FIK ni aniqlashda $U_2 \approx U_{2N}$ = const deb qabul qilish mumkin. U holda

$$P_2 = m\, U_2 I_2 \cos\varphi_2 = K_{yu} m\, U_{2N} I_{2N} \cos\varphi_2 = K_{yu} S_N \cos\varphi_2\,, \qquad (34.18)$$

bu yerda $S_N = mU_{2N} \cdot I_{2N}$ – transformatorning nominal quvvati; m – fazalar soni. (34.16; 34.17) va (34.18) larni (34.11) ga qo'yilsa transformatorning FIK hisoblash formulasi kelib chiqadi:

$$\eta = 1-(P_0+K^2_{yu}P_{qt.N})\,/\,(K_{yu}\,S_N\cos\varphi_2+P_0+K^2_{yu}P'_{qt.N}). \qquad (34.19)$$

Salt ishlash va qisqa tutashuv isroflarining o'zaro nisbati P'_0/P'_{qt} ≈0,15÷0,35 va FIK $0{,}98<\eta<0{,}995$ bo'lgan zamonaviy kuch transformatorlarida $K_{yu.max} \approx 0{,}5 \div 0{,}6$ bo'ladi.

FIK ga yuklamaning xarakteri ham ta'sir qiladi. Transformator yuklamasining qiymati o'zgarmas (K_{yu} = const) bo'lganda uning elektr isroflari ham o'zgarmas bo'ladi. Bunday sharoitda quvvat koeffitsienti ($\cos\varphi_2$) ning oshirilishi, aktiv quvvatning o'sishiga olib keladi va natijada transformatorning FIK η oshadi.

Uch chulg'amli transformatorning FIK quyidagi formula bo'yicha aniqlanadi:

$$\eta_{uch}=\left[1-\frac{P'_{0N}+mI^2_{1N}\left(\kappa^2_{yu1}\bullet r_1+\kappa^2_{yu2}\bullet r'_2+\kappa^2_{yu3}\bullet r'_3\right)}{S_N\left(\kappa_{yu2}\cos\varphi_2+\kappa_{yu3}\cos\varphi_3\right)+mI^2_{1N}\left(\kappa^2_{yu1}\bullet r_1+\kappa^2_{yu2}\bullet r'_2+\kappa^2_{yu3}\bullet r'_3\right)}\right]100,$$

(34.19)

bunda: $k_{yu2} S_N = S_2$; $k_{yu3} S_N = S_3$; S_N – transformatorning to'la nominal quvvati; $k_{yu1} = I_1/I_{1N}$, $k_{yu2} = I_2/I_{2N}$, $k_{yu3} = I_3/I_{3N}$ – mos ravishda birlamchi, ikkinchi va uchinchi chulg'amlarning yuklama koeffitsientlari; $\cos\varphi_2$ va $\cos\varphi_3$ – yuklamalarning quvvat koeffitsientlari; $mI^2_{1N}\left(\kappa^2_{yu1}\bullet r_1+\kappa^2_{yu2}\bullet r'_2+\kappa^2_{yu3}\bullet r'_3\right)$ – elektr isroflari; P'_{0N} – transformatorga nominal kuchlanish berilgandagi salt ishlash isroflari.

Ikkinchi va 3-chulg'am quvvat koeffitsientlari $\cos\varphi_2 = \cos\varphi_3 = 1$ bo'lganda uch chulg'amli transformatorlarning FIK η = 98,25 ÷ 99,25 foiz bo'ladi.

34.2. Elektr mashinalarining qizishi. Ish rejimlari

Elektr mashinalarining qizishi. EM larining ish jarayonida energiyaning bir qismi ulardagi isroflarni qoplashga sarflanadi. Energiya isroflarining barcha turlari (bularga oid ma'lumot 34.3-bandda berilgan) issiqlikka aylanib, asosan EM ning aktiv qismlari temperaturasini oshirsa, uning bir qismi esa atrof muhitga uzatiladi.

EM si chulg'amlar, magnit o'tkazgich elementlari va konstruktiv detallar majmuasidan iborat. Bu qismlarning issiqlik o'tkazuvchanligi, issiqlik sig'imi va sovitilish sharoitlari har xil bo'ladi, bu esa, EM da issiqlik maydoni taqsimlanishining murakkab xarakterda ekanligini ko'rsatadi. Lekin, EM ning qizish jarayonidagi umumiy qonuniyatlarni aniqlash maqsadida EM sini bir jinsli qattiq jism sifatida qaralsa qo'yilgan masalani yechishdagi birinchi yaqinlashish bo'ladi. Bunday taxminda EM ning qizishi uning butun hajmi bo'yicha bir tekis yuz beradi va issiqlik EM sirtining butun yuzasidan bir xil tarqaladi, deb hisoblanadi.

Bunday shartlarda *issiqlik energiyasining muvozanat tenglamasi* (energiyaning saqlanish qonuni) quyidagicha yoziladi:

$$Q \cdot dt = cm \cdot d\tau + \alpha \cdot S_{sov} \cdot \tau \cdot dt\,, \qquad (34.21)$$

bu yerda: $\boldsymbol{cm \cdot d\tau}$ – issiqlik energiyaning EM sida yutilib uning temperaturasini oshiradigan qismi; $\alpha \cdot \boldsymbol{S_{sov}} \cdot \tau \cdot \boldsymbol{dt}$ – issiqlik energiyaning atrof muhitga tarqaladigan qismi; $\boldsymbol{s}$ – EM sining solishtirma issiqlik sig'imi (mashinaning 1 kg massasi temperaturasini 1 °C ga oshirish uchun zarur bo'ladigan issiqlik miqdori), J/(kg · °C); $\boldsymbol{m}$ – EM ning massasi, kg; ф= $\vartheta_{mash} - \vartheta_{atrof}$ – EM temperaturasining sovitish muhiti temperaturasidan oshishi, °C; α – EM sovitish yuzasining issiqlik berish koeffitsienti, W/(m^2 · °C); $\boldsymbol{S_{sov}}$ – EM ning sovitish yuzasi, m^2.

Issiqlik atrof muhitga (yoki sovitish muhitiga) asosan issiqlik o'tkazuvchanlik va konveksiya vositalarida o'tkaziladi (issiqlikning nurlanish ko'rinishida uzatilish juda ham kam bo'ladi). EM sining temperaturasi ϑ_{mash} va ф kattaligi oshgan sari atrof muhitga (sovitish muhitiga) tarqaladigan issiqlik miqdori o'sib, EM ichki temperaturasini oshiradigan issiqlik qismi kamayadi. Bu jarayonning borishida EMsining temperaturasi o'zining barqaror qiymatiga yetadi, ya'ni issiqlik muvozanati rejimi vujudga kelib, EM dan ajralib chiqadigan issiqlikning hammasi atrof muhitga beriladi. Bu holda $cm \cdot d\,\tau = 0$ bo'lib, issiqlikning

muvozanat tenglamasi (34.21) quyidagi ko'rinishda yoziladi:

$$Q = \alpha \cdot S_{sov} \cdot \tau_{r} . \qquad (34.22)$$

(34.29) dan τ ning barqarorlashgan qiymati (τ_{r}) aniqlanadi:

$$\tau_{r} = Q/ (\alpha \cdot S_{sov}). \qquad (34.23)$$

demak, τ_{r} ning qiymati mashina massasiga bog'liq bo'lmasdan, vaqt birligida EM dan ajralib chiqadigan issiqlik miqdori Q ga to'g'ri mutanosib bo'lib sovitish sirti yuzasi S_{sov} ga va issiqlik berish koeffitsienti α ga teskari mutanosibda bo'lar ekan. EM ning yuklamasi qancha ko'p bo'lsa, Q ning oshishi tufayli τ_{r} ning qiymati ham mos ravishda ko'payadi. Sovitilish sharoiti yaxshilangan sari τ_{r} kamaya boradi.

EM ni yaxshi sovitish maqsadida quyidagi usullardan va vositalardan foydalaniladi: a) o'rta va kam quvvatli EM larida staninaning tashqi sirtiga qovurg'asimon shakl berib sovitish yuzasini oshirish; b) ichki (yoki tashqi) ventilator qo'yish (ayrim EM larida ikkalasini ham); d) katta quvvatli EM larda sovitgich qurilmalaridan foydalanish; e) o'ta o'tkazuvchanlikka asoslangan istiqbolli sovitish sistemasidan foydalanish.

EM sining sovitilishi yaxshilanganda issiqlikni konveksiya yo'li bilan chiqarishning kuchayishi hisobiga koeffitsient α oshadi. Sovitishni sun'iy yo'llar bilan jadallashtirish tufayli ma'lum gabaritdagi EM dan katta quvvat olishga yoki ma'lum quvvatda EM ning gabaritini kamaytirishga erishiladi.

(34.21) differensial tenglamani yechib quyidagini olamiz:

$$\tau = \tau_{r} \, [1 - \exp(-t / T)] + \tau_{0} \exp(-t / T) . \qquad (34.24)$$

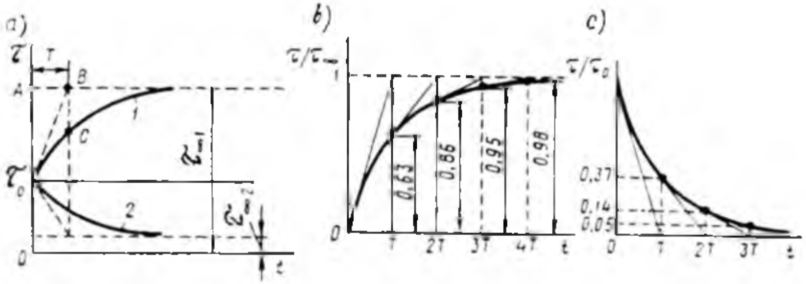
bu yerda τ_{0} – EMsida temperatura oshishining boshlang'ich qiymati;

$T = cm/(\alpha \, S_{sov})$ – qizishning vaqt doimiyligi, ya'ni EM qizishining tezligini xarakterlovchi kattalik.

Agar EM ishlashiga qadar qizdirilmagan bo'lsa, ya'ni uning temperaturasi atrof muhit temperaturasiga teng bo'lganda $\phi_{0} = 0$ bo'ladi va qizish tenglamasi quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$T = \tau_{r} \, [1 - \exp(-t / T)] . \qquad (34.25)$$

Qizish jarayonining boshlanishida barcha hosil bo'lgan issiqlik mashinaning o'zida yutiladi va uning temperaturasi tez o'sadi. Agar shu jarayonda EM sidan atrof-muhitga issiqlik uzatilmaganda edi, unda $\tau = \tau_{r}$ muvozanat holat 34.2.*a*-rasmdagi B nuqtaga to'g'ri kelgan bo'lardi, lekin EM temperaturasining atrof muhit (yoki sovitish muhiti) temperaturasidan oshishi τ ning o'sa borishi bilan issiqlikning sovitish muhitiga beriladigan qismi ko'payishi tufayli temperaturaning o'sish tezligi kamayadi va mazkur muvozanat holat C nuqtaga to'g'ri keladi.



34.2-rasm. *Umumiy hol uchun elektr mashinasida qizish (1) va sovish (2) jara-yonlarining vaqt bo'yicha o'zgarishi (**a**); τ = 0 dan boshlab mashinaning qizishi (**b**); mashinaning 0°Cgacha sovish jarayonining vaqt bo'yicha o'zgarishi (**c**).*

EM temperaturasining sovitish muhiti temperaturasidan oshishining barqarorlashgan qiymat τ_r ga yetgunga qadar ketgan vaqtga, ya'ni vaqt doimiysi T ga bog'liq bo'ladi. T qancha kam bo'lsa, qizish jarayoni shuncha tez kechadi, ya'ni $t \approx (3\text{-}4)T$. Qizish jarayoni uchun ketgan vaqtni grafik usulda qizish egri chizig'i $\tau/\tau_r = f(t)$ dan aniqlash mumkin (34.2,*b*-rasm).

Vaqt doimiysi (T) EM sining konstruksiyasiga va quvvatiga bog'liq bo'ladi. O'rta quvvatli EM lari uchun T birnecha minutga teng, katta quvvatli EM lari uchun esa u birnecha soatga yetadi.

Agar $\tau_r < \tau_0$ bo'lsa, (34.24) tenglama EM sining *sovitilish jarayonini xarakterlaydi.* Jismning barqarorlashgan temperaturasi sovitish muhitiniki bilan tenglashsa ($\tau_r = 0$), (34.24) tenglama quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp(-t / T). \qquad (34.26)$$

EM sovishining vaqt bo'yicha o'zgarish bog'liqligi $-\tau/\tau_0 = f(t)$ va sovitish uchun ketgan vaqtning grafik usulda aniqlash usuli 34.5,*s*-rasmda keltirilgan.

Yuqorida EM ni bir jinsli jism sifatida qaralganda sodir bo'ladigan qizish va sovish jarayonlarining qisqacha bayoni bilan tanishildi. Haqiqatda esa EM ning ayrim qismlari har xil temperaturaga ega va shu sababli, EM ni o'zaro issiqlik almashuvi mavjud bo'lgan birnecha bir jinsli jismlarning majmuasidan iborat, deb qaralganda to'g'ri bo'lar edi. Haqiqiy sharoitda *T* ning kattaligi ham o'zgarmas bo'lmaydi, chunki issiqlik uzatish koeffitsientlari ayrim darajada temperaturaga bog'liq

bo'ladi. Undan tashqari havo yoki boshqa sovitish moddasi ventilatsion kanaldan oqib o'tganda qizishi tufayli sovitish yuzasining har xil qismlari uchun sovitish muhitining temperaturasi har xil qiymatga ega bo'ladi.

Shunday qilib, EM ning qizish va sovish egri chiziqlari eksponensial o'zgarishiga nibatan farqli bo'ladi. Lekin ko'pchilik amaliy hollarda yuqorida ko'rilgan nazariyaga asoslangan holda mazkur o'zgarishlar eksponenta ko'rinishida o'zgaradi, deb qaralganda katta xato bo'lmaydi.

Elektr mashinalarining asosiy nominal ish rejimlari. EM larining ish rejimlari ekspluatatsiya sharoitida har turli bo'ladi, ya'ni davomli, qisqa muddatli, takrorlanuvchi qisqa muddatli va normal ish davri salt ishlash bilan almashinib turadigan ish rejimlariga bo'linadi.

EM taxminan to'la yuklama bilan uzoq vaqt mobaynida (masalan, elektr stansiyalarda elektr generatorlari, nasos qurilmalarida elektr motorlari va boshqalar) va nisbatan qisqa muddatda (ba'zi bir yuk ko'tarish kran motorlari) ishlashi mumkin. Zamonaviy avtomatlashtirilgan sanoat va boshqa qurilmalarda EM lari ko'pchilik hollarda davriy rejimda ishlaydi. Umuman, EM lari o'zgaruvchan yuklama bilan ishlaydi.

EM ning o'zgarmas nominal yuklamadagi ishi sovitish muhiti temperaturasi o'zgarmaganda mashina qismlari temperaturasining oshishi kamida barqarorlashgan qiymatlariga erishgan vaqtga qadar davom qilsa, bunday rejimni EM ning ***davomli nominal ish rejimi*** deyiladi (bu rejimning standart bo'yicha shartli belgilanishi ***S1***).

O'zgarmas nominal yuklamaning davrlari, sovitish muhitining temperaturasi o'zgarmas bo'lganda EM ning ishdan to'xtatilish davrlari (pauzalari) bilan almashinib turadigan ish rejimiga ***qisqa muddatli (S2) nominal ish rejimi*** deyiladi. Bu rejimda yuklama davrida EM qismlari temperaturasining oshishi barqarorlashgan qiymatgacha yetadigan vaqtdan ancha kam, EM ni to'xtatish davrlari esa davomli bo'lib, bunda u amaliy ravishda atrof muhit temperaturasigacha sovishga ulguradi. Bunday EM lar 15, 30, 60 va 90 min. bo'lgan davomli ish davriga tayyorlanadi.

EM temperaturasining qisqa muddatli rejimdagi oshishi $\tau_{kr} \leq \tau_{max}$ bo'lgandagi qisqa muddatli rejimning ruxsat berilgan davomiyligi t_{kr} ni quyidagi formuladan aniqlash mumkin:

$$\tau_{kr} = \tau_y \, [1 - \exp(-t_{kr} / T)] . \qquad (34.27)$$

Demak, qisqa muddatli rejimda τ_y ning qiymatini davomli ish rejimdagi EMga nisbatan $1/[1 - \exp(-t_{kr}/T)]$ marta oshirish mumkin

ekan. Quvvat isroflari $\Sigma R'$ ning ruxsat berilgan qiymatlarini ham shuncha marta oshirsa bo'ladi. Shuning uchun qisqa muddatli rejimga hisoblangan quvvatdagi EM larning gabarit o'lchamlari va massasi davomli ish rejimga hisoblangan EMlarnikiga nisbatan ancha kichik bo'ladi. *Tushuntirishga boshqacha yondashilganda*, EM larining berilgan gabaritlarida materiallarning sarflanishida qisqa muddatli ish rejimidagi EM larining quvvati ish rejimi davomli bo'lgan EM larnikiga nisbatan katta bo'ladi.

O'zgarmas nominal yuklamaning qisqa muddatli davrlari, sovitish muhiti temperaturasi o'zgarmaganda, EM ishdan to'xtatilishi (pauza)ning qisqa muddatli davrlari bilan almashinib turadigan ish rejimiga ***takrorlanuvchi qisqa muddatli (S3)*** ish rejimi deyiladi. EMsining umumiy ish vaqtini $t_w = t_{ish} + t_p$ davomiylikda davriy takrorlanadigan sikllarga bo'lib o'rganiladi. Bu rejimda EM ning normal ish davrlari va pauza davrlari kichik bo'lib, yuklama bilan ishlagan davrida EM temperaturasining oshishi barqarorlashgan qiymatigacha yetmaydi, pauza davrlarida esa EM sining temperaturasi atrof muhitnikigacha sovishga ulgurmaydi.

Standartga binoan EM sining bu rejimda ishlash siklidagi vaqt 10 minutdan oshmasligi kerak. Takrorlanuvchi qisqa muddatli ish rejimi mashina ishining davomiyligi bilan xarakterlanadi (uning standartda belgilanishi PV – "prodoljitelnost vklyucheniya" ruscha so'zlarning 1-harflari).

$$PV_{\%} = (t_{ish} / t_p) \cdot 100 = [t_{ish} / (t_{ish} + t_p)] \cdot 100. \qquad (34.28)$$

PV ning standart qiymatlari 15, 25, 40 va 60 % lardan iborat.

Normal ish davri salt ishlash bilan almashinib turadigan ish rejimi. Mazkur rejimda EM ning yuklama bilan qisqa muddatli ish davrlari salt ishlash davrlari (pauzalar) bilan almashinib turadi.

Bu rejim yuklamaning nisbiy davomiyligi bilan xarakterlanadi.

$$PN_{(\%)} = (t_{ish} / s) \cdot 100 = [t_{ish} / (t_{ish} + t_0)] \cdot 100. \qquad (34.29)$$

bu yerda t_{ish} – ish vaqti; t_0 – salt ishlash vaqti.

Bu kattalikning standart qiymatlari 15, 25, 40 va 60 % larni tashkil qiladi. Siklning davomiyligini 10 minutga teng, deb qabul qilinadi.

34.3. Umumiy maqsadli elektr mashinalarini sovitish

EM larining sovitish sistemasi tabiiy va sun'iy xillarga bo'linadi. Ularni sovitish uchun qanday modda qo'llanilishiga ko'ra ular havo,

vodorod, moy va suv bilan sovitiladigan EM lariga bo'linadi. Sovitish usuliga ko'ra ular quyidagilarga bo'linadi:

a) chetdan (bilvosita) sovitiladigan (bunda sovituvchi gaz yoki suyuqlik chulg'am o'tkazgichlariga tegmaydi), bunday sovitilishga IP44 himoyalanish darajali EM lari misol bo'la oladi;

b) bevosita sovitiladigan (bunda sovituvchi gaz yoki suyuqlik EM ning qizigan aktiv qismlariga to'g'ridan to'g'ri tegib sovitadi), bunday sovitilishga IP23 himoyalanish darajali EM lari kiradi.

Maxsus EM larida bug'lanma sovitish sistemasi qo'llaniladi, bunda suyuqlik EM ning issiqlik ajraladigan yuzalaridan bug'lanadi.

EM ning gabaritlari (tashqi o'lchamlari) sovitish sistemasini to'g'ri tanlashga bog'liqdir.

Keyingi yarim asr ichida bir xil gabaritlarda havo bilan sovitishdan bevosita suv bilan sovitishga o'tish tufayli turbogeneratorlarning quvvatini 10 marta oshirishga erishildi. Bu XX asrdagi eng buyuk yutuqlardan biridir. Sovitish sistemasini takomillashtirish tufayli quvvat birligiga to'g'ri keladigan massaning kamayishi EM larining boshqa turlariga ham xos bo'lgan yutuqdir.

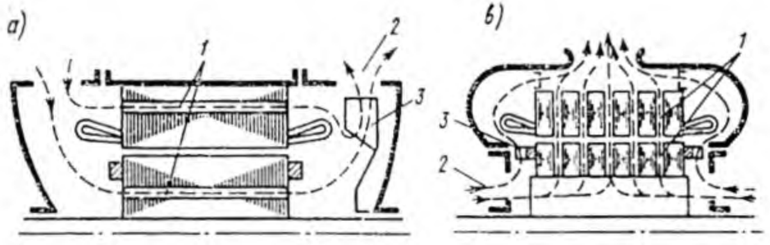
Umumiy maqsadli EM larni sovitish uchun ko'pchilik holda ularning qizigan qismlariga ventilator vositasida havoni majburiy haydab issiqlik atrof muhitga chiqariladi yoki havo sovitgichda sovitiladi.

Ventilator vositasida sovitiladigan EM lar o'z-o'zini sovitadigan va mustaqil sovitiladigan turlarga bo'linadi. O'z-o'zini sovitadigan turida ventilator valga o'rnatiladi yoki EM ning aylanuvchi qismida kurakchalar qo'yilgan bo'ladi.

Havo bilan mustaqil sovitilganda sovitish muhiti EM valiga mexanik ulanmagan maxsus qurilma vositasida mashina ichiga beriladi. Nominal aylanish chastotasi kam bo'lgan yirik yoki aylanish chastotasi keng ko'lamda o'zgartiriladigan EM larida mustaqil sovitish sistemasi qo'llaniladi.

Agar sovituvchi havo oqimi EM sining ichidan o'tkazilsa — *ichki ventilatsiya* (sovitish usuli — IC01), bunda mashina korpusida va podshipnik qalqonlarida havo kirish uchun teshiklar bo'ladi (bajarilishi — IP22 va IP23), korpusining qovurg'asimon yuzasiga tashqaridan berib sovitilganda — *tashqi ventilatsiya* deyiladi (bunda sovitilish usulining belgilanishi — IC0141, bajarilishi — IP44).

Ichiga havo oqimi kirmaydigan yopiq EM larida *tashqi ventilatsiya* ishlatiladi. Bu holda EM ning ichidagi havoni harakatga keltirib, ya'ni



34.3-rasm. *Ochiq va himoyalangan elektr mashinalarining tegishlicha aksial (**a**) va radial (**b**) ventilatsiya sistemalari sxemasi: 1 — ventilatsiya kanallar; 2 — sovitish havo oqimlari; 3 — ventilator.*

aralashtirib turish uchun qo'shimcha ichki ventilator o'rnatiladi (34.3,*b*-rasm).

Sovituvchi gaz oqimlari harakatining EM ichidagi yo'nalishiga bog'liq holda *radial* va *aksial* ventilatsiyalarga bo'linadi.

EM aylanish o'qi bo'yicha kanallardan o'tib sovitilganda *aksial ventilatsiya* bo'lib (34.3,*a*-rasm), EM ning aylanish o'qiga perpendikular yo'nalishda, ya'ni mashinaning radiusi bo'yicha joylashgan kanallar orqali sovitilganda esa *radial ventilatsiya* (34.3,*b*-rasm) bo'ladi.

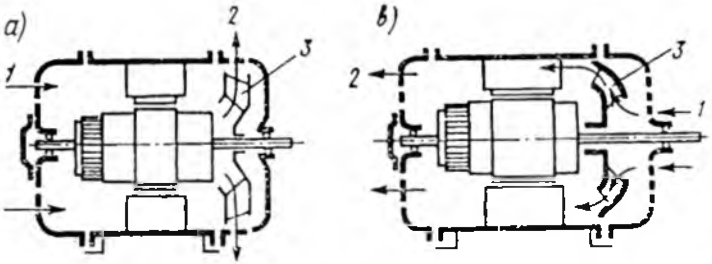
Radial ventilatsiya EM ning bir tekis sovishini ta'minlaydi. Lekin radial ventilatsion kanallarni bajarish EM ning konstruksiyasini murakkablashtirib, uning gabaritlarini va tannarxini oshiradi.

Aksial ventilatsion kanallarni konstruktiv ravishda bajarish radial kanallarga nisbatan oddiy, lekin u mashinaning bir tekis sovishini ta'minlay olmaydi, chunki sovituvchi gaz EM ning aylanish o'qi bo'yicha o'tish jarayonida nisbatan qiziydi. Ayrim hollarda EM ni sovitishda radial va aksial ventilatsiyalarning ikkalasi ham ishlatiladi.

O'rtacha va katta quvvatli EM larida mustaqil (majburiy) ventilatsiya sistemasi ishlatilib mashinaga sovituvchi gaz alohida yuritmali maxsus ventilator tomonidan beriladi (IC05 va IC37 sovitish usullari).

O'z-o'zini sovitish-ning aksial turida (mustaqil ventilatsiyada ham) ventilator vositasida EM ichiga haydalgan havo(yoki gaz) ventilatsion kanallardan o'tib tashqariga chiqariladi (34.4,*b*-rasm).

Sovitishning boshqacha turida esa EM ga kiradigan havo (yoki gaz)ning temperaturasi sovitish muhitiniki bilan bir xil bo'ladi. EM da qizigan havo ventilator yordamida tortib (so'rib) olinadi va tashqariga



34.4-rasm. *Mashinada qizigan havoni so'rib korpusdan tashqariga chiqaruvchi (a) va sovituvchi havoni mashina ichiga haydovchi (b) ventilatsiya sistemalari: 1 — kiruvchi havo; 2 — chiquvchi havo; 3 — ventilator.*

chiqariladi (34.4,*a*-rasm). Sovitishning bu turi oldingiga nisbatan afzalroq hisoblanadi.

Sovitishda vodorodni qo'llash. EM ni vodorod bilan sovitish havoga nisbatan ancha samaralidir, chunki uning atmosfera bosimidagi issiqlik o'tkazuvchanligi 7,1 marta katta; bir xil tezlikdagi o'rtacha issiqlik uzatish koeffitsienti 1,7 marta, havo bilan bir xil og'irliqdagi vodorodni ishlatganda esa — 11,8 marta kattadir. Havoga nisbatan kam og'irliqdagi vodorod ishlatilganligi tufayli aylanish chastotasi katta bo'lgan yirik EM larining ventilatsion isroflari deyarli 10 marta kamayadi. Vodorodli sovitishda izolatsiyaning xizmat muddati oshadi, chunki bunda oksidlanish jarayoni bo'lmaydi. Shu sababli quvvati 25 000 kW va undan katta, aylanish chastotasi ham katta bo'lgan o'zgaruvchan tok mashinalarini sovitish uchun vodorod keng qo'llaniladi.

Vodorodli sovitishda ventilatsiyaning yopiq sistemasi qo'llanilib, uning bosimi atmosfera bosimidan biroz ko'proq (1,05 atm) bo'ladi. Ayrim hollarda sovitish jadalligini kuchaytirish uchun sovitish sistemasidagi vodorodning bosimini 3÷5 atm. ga oshiriladi (bu holda EM ning germetikligi kuchaytiriladi).

Chulg'amlarni bevosita sovitish. Quvvati 300÷500 MW va undan katta bo'lgan EM larini vodorod bilan sovitiladigan ventilatsiyaning yopiq sistemasi ham yetarli bo'lmas ekan. Shuning uchun bunday EM larida chulg'am ichi kavak o'tkazgichlardan tayyorlanadi va bu o'tkazgichlarning ichidan birnecha atmosfera bosimda vodorod o'tkazilib sovitiladi. *Vodorodning o'rniga distillangan (tuzdan tozalangan) suvni ishlatsa yana ham samarali bo'ladi.* Ayrim EM larining rotorini

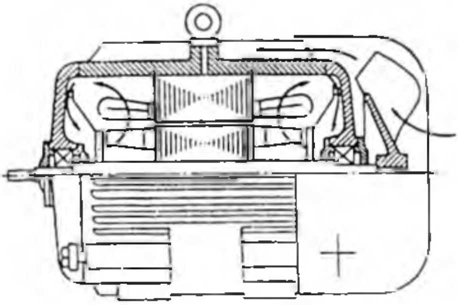
vodorod bilan, statorini esa suv bilan sovitiladi. Chulg'amga vodorod kompressor yordamida beriladi, suvni berish uchun esa nasoslar qo'llaniladi.

Chulg'amlarni bevosita o'tkazgichlar ichidan sovitishda izolatsiyada temperaturaning tushishi bo'lmaydi va tok zichligini keskin oshirish mumkin. Suv bilan bevosita sovitilganda EM quvvatining chegaralanishiga aktiv qismlarining qizishi emas, balki boshqa texnik va iqtisodiy ko'rsatkichlar sabab bo'ladi.

Sovitish usullari bo'yicha EM larining bajarilishi GOST 20459–87 tomonidan belgilanadi. Sovitish usullarining belgilanishi lotincha IC, ya'ni *"International Cooling"* – inglizcha so'zlarning bosh harflari orqali belgilanadi. Bu harflardan keyin yoziladigan raqamlar va harflar (A – havo, H – vodorod, N – azot, W – suv, V – transformator moyi va boshq.) sovitish sistemasini xarakterlaydi. Agar sovitish muhiti havo bo'lsa, unda harf tushirib qoldiriladi.

Masalan, IC01 – ventilatori valda o'rnatilgan o'z-o'zini ventilatsiya qiluvchi himoyalangan EM;

IC0141 – EM valida joylashtirilgan tashqi ventilator tomonidan



34.5-rasm. *IP44 himoyalanish darajali asinhron motorda sovitish muhitining harakatlanish sxemasi*

haydalgan havo oqimi bilan sovitiladigan yopiq mashina; ICW37A81 – havo bilan sovitiladigan (sovitgichidagi suvning sirkulyatsiyasi alohida nasos bilan yoki suv o'tkazgich tarmog'idan amalga oshiriladigan) va boshqalar.

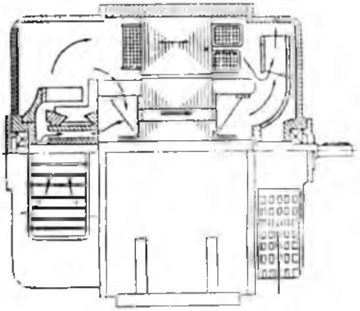
Har xil tipli EM larining ventilatsion sistemalari. IP44 himoyalanish darajali, ichki va tashqi ventilatsion sistemalarga ega bo'lgan asinxron motorlar (34.5-rasm) keng qo'llanilmoqda. Ventilyatsiyaning tashqi sistemasi ochiq bo'lib, aksial yo'nalishda sovitiladi. Tashqi o'rnatilgan markazdan qochirma ventilator atrof muhitdan havoni so'rib kam quvvatli mashinalarda korpusining qovurg'alararo kanallariga yoki katta

quvvatli EM larda issiqlikni almashtirib beruvchi trubali qurilmaga yo'naltirilib, ulardan atrof muhitga yana chiqarib yuboriladi (34.5-rasm).

Kam quvvatli EM larida ventilatsiyaning ichki sistemasi yopiq holda radial yo'nalishda bo'ladi. Ventilator sifatida rotorning qisqa tutashgan halqalaridagi qanotchalardan foydalaniladi.

IP23 himoyalanish darajali asinxron motorlar ventilatsiyaning radial sistemasiga ega.Ularda ventilator sifatida rotor kurakchalari xizmat qiladi.

O'zgarmas tok mashinalarini sovitish. Bular odatda aksial ventilatsiya sistemasiga ega (34.6-rasm). EM siga havo podshipnik qalqonidagi pardali panjara orqali kirib kollektorni sovitgandan keyin ikkita oqimga bo'linadi: ulardan bittasi induktor qutblari orqali, ikkinchisi – kollektor kanallari va yakor chulg'amining pazdan tashqari qismlari orqali o'tib, yakorning aksial kanallariga kiradi. Ventilatorga kirish oldida ikkala oqim birlashadi va keyin mashinadan tashqariga chiqariladi.

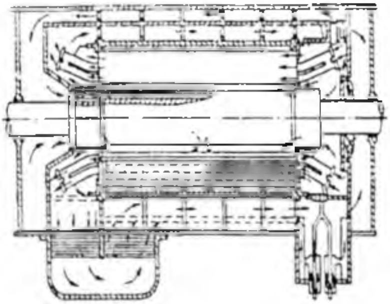


34.6-rasm. *Ventilatsiyaning aksial sistemasida IP23 himoyalanish darajali O'TM da sovitish muhitining harakatlanish sxemasi.*

34.4. Turbogeneratorlar va gidrogeneratorlarning sovitish sistemalari

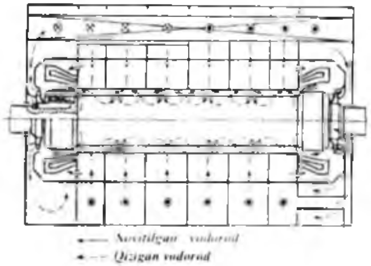
Turbogeneratorlarning sovitish sistemalari. Katta quvvatli turbogeneratorlarda ventilatsiyaning aksial (34.7-rasm) va radial sxemalari (34.10-rasm) yoki ularning aralashgan (radial-aksial) sxemasi (34.8-rasm) keng ishlatiladi.

Quvvati 30 MW gacha bo'lgan turbogeneratorlarda tashqaridan (sirtidan) havo yordamida sovitiladi. Quvvati $P > 60$ MW bo'lgan turbogeneratorlarda chulg'am ichi kavak o'tkazgichlarining ichidan



34.7-rasm. *TGV-300 tipli quvvati 300 MW bo'lgan turbogeneratorning aksial sistemali ventilatsiya sxemasi.*

vodorodni, distillangan (ya'ni tuzdan tozalangan) suvni va transformator moyini o'tkazib sovitiladi. *Bulardan yaxshi sovitish qobiliyatiga egalari* transformator movi va distillangan suv hisoblanadi. Masalan, sovitish muhitlarining bir xil tezligida, havoga nisbatan vodorod 7,1 marta, transformator movi 16,5 marta, suv esa 125 marta ko'p issiqlikni sovitish muhitiga uzatish qobiliyatiga ega.



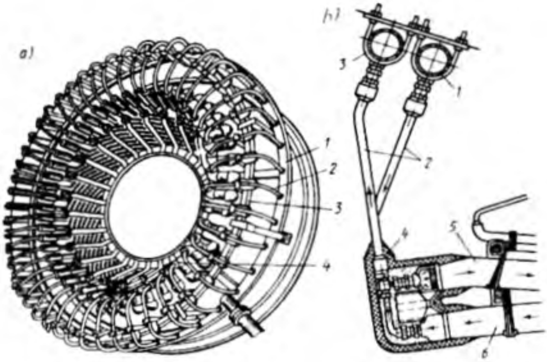
34.8-rasm. *TVV-200-2 tipli quvvati 200 MW bo'lgan turbogeneratorning, qizigan gazni bir oqimli so'rib olib gorizontal joylashgan gaz sovitgichga jo'naltiruvchi radial-aksial ventilatsiya sistemaei.*

34.7-rasmda quvvati 300 MW, ventilatsiyaning *aksial sistemasiga* ega bo'lgan turbogeneratorning konstruktiv sxemasi ko'rsatilgan. Bu sistemada havo bosimini hosil qiladigan element bitta bo'lib, ventilatsiya sxemasi shoxobchalarga bo'lingan. Sovituvchi gazning aylanishi (tsirkulyatsiyasi) yopiq sikl bo'yicha amalga oshiriladi:

1) stator va rotor chulg'amlari va statorning po'lat o'zagini oshirilgan bosimli vodorod bilan sovitishning *aksial sistemasi*, ya'ni valning o'qiga parallel yo'nalgan sovitish sistemasi;

2) mashinaning radiusi bo'yicha yo'nalgan *(radial)* kanallardan hosil bo'lgan sovitish sistemasidan oshirilgan bosimli vodorod bilan sovitish sistemasi;

3) stator va rotor chulg'amlari o'tkazgichlarining ichidagi sovitish kanallaridan *distillangan suv o'tkazib* (34.9-rasm), stator va rotor po'lat



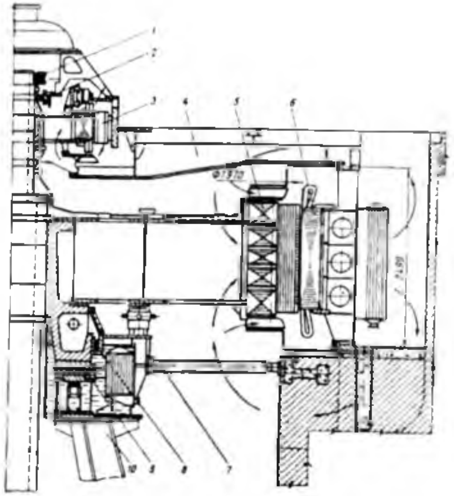
34.9-rasm. *Stator chulg'ami ichi kavak o'tkazgichlariga sovitilgan distillangan suvni berish va qizigan suvni sovitgichga yo'naltirish qurilmasi:* ***a*** *— umumiy ko'rinishi;* ***b*** *— konstruktiv sxemasi; 1, 3 — tegishlicha sovuq va issiq suv kollektori; 2 — egiluvchan izolatsion shlangalar;* ***4*** *— suv taqsimlagich uchliklari;* ***5, 6*** *— tegishlicha chulg'am sterjenlari (o'tkazgichlari)ning sovitilgan suv kiradigan va qizigan suv chiqadigan qismlari.*

o'zaklarini esa havo yoki vodorod bilan sovitish sistemasi;

4) stator chulg'ami o'tkazgichlarining ichidagi va po'lat o'zagidagi sovitish kanallardan transformator moyini o'tkazib, rotor chulg'ami o'tkazgichlarining ichidan distillangan suv o'tkazib va rotor po'lat o'zagini esa havo yoki vodorod bilan sovitish sistemasi.

Gidrogeneratorlarning sovitish sistemasi. Gidrogeneratorlar uchun sovitish sistemasining konstruktiv bajarilishi ularning *osma* va *soyabonsimon* turlari uchun umumiydir.

Sovitish havosining bosimini ventilator va rotor qismlarining shamol hosil qiluvchi qismlari tomonidan hosil qilinadi. Gidrogeneratorning radial sistemali ventilatsiya sxemasi 34.10-rasmda ko'rsatilgan.



34.10-rasm. *VGS 850/135-56 tipli soyabonsimon bajarilgan bir yo'naltiruvchi podshipnikli takomil-lashtirilgan konstruksiyali (bunda: 1 — kontakt halqalar; 2 — rostlash generatori; 3 — qo'zg'atgich; 4 — yuqorgi krestovina, ya'ni bir-biriga ko'ndalang chalishtirilgan detal"; 5 — rotor; 6 — stator; 7 — tirgo-vich; 8 — yo'naltiruvchi podshipnik; 9 — tayanchostligi; 10 — konussimon tayanch) gidrogeneratorning radial sistemali ventilatsiya sxemasi.*

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

Asosiy adabiyotlar

1. *Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф.* Электрические машины: учебное пособие для студ. вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 320 с.

2. *Бут Д.А.* Основы электромеханики: Учеб. пособие. –М.: Изд-во МАИ, 1996. – 468с.

3. *Быстрицкий Г.Ф., Кудрин Б.И.* Выбор и эксплуатация силовых трансформаторов: Учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 176 с.

4. *Волдек А.И., Попов В.В.* Электрические машины. Машины переменного тока: Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2008. – 350 с.

5. *Гольдберг О.Д., Хелемская С.П.* Электромеханика: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Под ред. О.Д. Гольдберга. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. –512 с.

6. *Епифанов А.П.* Электромеханические преобразователи энергии. Учебное пособие для вузов. – СПб.: Изд-во «Лан», 2004. - 208 с.

7. *Иванов-Смоленский А.В.* Электрические машины. В 2-х т. Учебник для вузов. – М.: Издательство МЕИ, 2004. Том 1 - 652 с.; Том 2 - 533 с.

8. *Копылов И.П.* Электрические машины: Учеб. для вузов. –2-е изд., перераб. – М.: Высш. шк.; Логос; 2000. – 607 с.

9. *Котеленец Н.Ф., Акимова Н.А., Антонов М.В.* Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин: Учебник для вузов / Под ред. Н.Ф. Котеленса. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 384 с.

10. *Salimov J.S, Pirmatov N.B., Bekchanov B.E.* Transformatorlar va avtotransformatorlar. Texnika oliy o'quv yurtlari uchun o'quv qo'llanma. –T.: Izd-vo "Vektor press", 2009.

11. *Hoshimov O.O., Imomnazarov A.T.* Elektr yuritma asoslari. 1-qism. Bakalavriatura ta'limining "Elektrotexnika, elektromexanika va elektrotexnologiyalar" yo'nalishi talabalari uchun o'quv qo'llanma. – Toshkent, TDTU, 2004. – 194 b.

12. http:/ww.unilib.neva.ru/dl/059/Head.html (Леонтев А.Г. Электронная книга по электромеханике).

13. http:/ww.sprinter.ru/advert/yandex-1884658.html (Попов В.В., Волдек А.И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. Учебник для вузов. – СПб.: Изд-во Питер, 2007. – 320 с.).

Qo‘shimcha adabiyotlar

14. *Allayev Q.R.* Elektromexanik o‘tkinchi jarayonlar. O‘quv qo‘llanma. – "Moliya" nashriyoti, 2007 y. – 272 b.

15. *Герман-Галкин С.Г., Кардонов Г.А.* Электрические машины: Лабораторные работы на ПК. – СПб.: КОРОНА принт, 2003. – 256 с.

16. *Ibragimov U.* Elektr mashinalari. Kasb-hunar kollejlari uchun darslik. – T.: O‘qituvchi, 2001. – 408 b.

17. *Кацман М.М.* Электрические машины. Учеб. для студентов средн. проф. учебных заведений. – М.: Высш. шк., 2000. – 463 с.

18. Кацман М.М. Справочник по электрическим машинам. Учеб. пособие для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 480 с.

19. *Katsman M.M.* Elektr mashinalari va elektr yuritmadan laboratoriya ishlari uchun qo‘llanma. Kasb-hunar kollejlari uchun o‘quv qo‘llanma. – T.: "Universitet" nashriyoti, 2003. – 203 b.

20. Лихачев В.Л. Электродвигатели асинхронные. – М.: СОЛОН-Р, 2002. – 304 с. 21. *Majidov S.* Elektr mashinalari va elektr yuritma. Kasb-hunar kollejlarining qishloq xo‘jaligini elektrlashtirish ixtisosliklari uchun darslik. –T.: O‘qituvchi, 2002. – 358 b.

22. *Петриков Л.В., Корнасхенко Г.Н.* Асинхронные электродвигатели: Обмоточные данные. Ремонт. Модернизация/ Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 496 с.

23. *Pirmatov N. B.* Transformatorlarni ishlab chiqarish texnologiyasi. – T.: "Cho‘lpon", 2006. – 56 b.

24. *Пирматов Н.Б., Ахматов М.Г.* Анормалные режимы работы синхронных машин двухосного возбуждения. – Т.: ТГТS, 2003. – 158 с.

25. *Pirmatov N.B., Yuldasheva O.E.* Elektromexanika (Elektr mashinalari) fanidan masalalar to‘plami. O‘quv qo‘llanma. – T.: TDTU, 2004. – 75 b.

26. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей /Под общей редакцией Б.М. Тешабаева, А.Г. Салиева/. Официалное издание – Т.: «УЗГОСЭНЕРГО-НАДЗОР», 2005. – 308 с.

27. Правила устройства электроустановок. СПб.: Издателство ДЕАН, 2004. – 464 с. 28. *Rentzsch H.* Elektromotoren. Elektric Motors, ABB Drivec AG. Turgi. Schweiz. Printed in the Federal Republic of Germany 1992. – P. 1–861.

29. *Salimov J.S., Pirmatov N. D.* Elektr mashinalari. Kasb-hunar kollejlari uchun o'quv qo'llanma. – T.: "O'qituvchi" NMIU. 2005. – 240 b.

30. *Hoshimov O.O., Saidahmedov S.S.* Elektr yuritma asoslari. Kasb-hunar kollejlari uchun darslik. T.: "Talqin" nashriyoti, 2004. – 288 b.

31. http:/ww.ielectro.ru/dokument/3215/Aboute.html (Трансформаторы силовые и из-мерительные. Справочник. Т.1-3).

32. http:/ww.ispu.ru/libraru/lessons/shishkin/index.html (Шишкин В.П. Электрические микромашины. Курс лекций. – Иваново, 2001).

33. Силовые трансформаторы. Справочная книга/Под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоиздат, 2004. –с. 616.

MUNDARIJA

So'zboshi 3
Kirish 4
K.1. Elektr mashinalari haqida umumiy ma'lumotlar 4
K.2. Elektr mashinalarida energiyaning elektromexanik o'zgartirilishi 7

I BO'LIM. TRANSFORMATORLAR

1-BOB. TRANSFORMATORLARGA OID UMUMIY MA'LUMOTLAR

1.1. Transformatorlarning elektroenergetikada tutgan o'rni 11
1.2. Transformatorlarning tasnifi, ularga qo'yiladigan asosiy talablar, gabaritlari va nominal kattaliklari 13

2-BOB. TRANSFORMATORLARNING MAGNIT SISTEMALARI VA CHULG'AMLARI

2.1. Transformatorlarning magnit o'tkazgichlari va ularning konstruksiyasi 16
2.2. Transformatorlarning chulg'amlari va ularning konstruksiyasi 19
2.3. Transformator va avtotransformator chulg'amlarining ulanish usullari, chulg'am uchlarining standart bo'yicha yangicha belgilanishi va uni tajribada tekshirish 22

3.BOB. TRANSFORMATORNING SALT ISHLASH REJIMIDAGI ELEKTROMAGNIT JARAYONLAR

3.1. Elektromagnit induksiya hodisasi, transformatorning ishlash prinsipi va elektr yurituvchi kuchlari 28
3.2. Uch fazali transformatorlar salt ishlash rejimining o'ziga xos xususiyatlari 31
3.3. Salt ishlash tajribasi va xarakteristikalari 35

4-BOB. SIMMETRIK YUKLAMA ULANGAN TRANSFORMATORDAGI ELEKTROMAGNIT JARAYONLAR

4.1. Lens qoidasi, yuklama ulangan transformatorning muvozanat tenglamalari 39
4.2. Transformatorning ikkilamchi chulg'am kattaliklarini birlamchi chulg'amga keltirish va vektor diagrammalari 41
4.3. Ikki chulg'amli transformatorning almashtirish sxemasi 45

4.4. Qisqa tutashuv tajribasi va xarakteristikalari 46

5-BOB. TRANSFORMATORNING EKSPLUATATSION XARAKTERISTIKALARI

5.1. Transformatorning tashqi xarakteristikalari va kuchlanish o'zgarishi 51
5.2. Transformatorlarda kuchlanishni rostlash usullari va vositalari 54

6-BOB. TRANSFORMATOR CHULG'AMLARINING ULANISH GURUHLARI VA TRANSFORMATORLARNING PARALLEL ISHLASHI

6.1. Transformator chulg'amlarining ulanish guruhlarini aniqlash 58
6.2. Uch fazali transformator chulg'amlarining ulanish guruhlarini tajriba yo'li bilan aniqlash va ularning qo'llanish sohalari 62
6.3. Transformatorlarning parallel ishlashi 67

7-BOB. UCH CHULG'AMLI TRANSFORMATORLAR. AVTOTRANSFORMATORLAR

7.1. Uch chulg'amli transformatorlar 73
7.2. Avtotransformatorlar 76

8-BOB. IKKI CHULG'AMLI TRANSFORMATORLARNING NOSIMMETRIK ISH REJIMLARI. TRANSFORMATORLARDA O'TISH JARAYONLAR

8.1. Ikki chulg'amli transformatorlarning nosimmetrik ish rejimlari ... 83
8.2. Transformatorlarda o'tish jarayonlar 89

9-BOB. MAXSUS MAQSADLI TRANSFORMATOR QURILMALARI

9.1. Maxsus maqsadli kuch transformatorlariga oid umumiy ma'lumotlar 92
9.2. Elektr yoyi vositasida payvandlash uchun transformatorlar 93
9.3. To'g'rilagich va avtomatika qurilmalari uchun transformatorlar 93
9.4. Elektrlashtirilgan temiryo'l va shahar elektr transportlari uchun kuch transformatorlarining o'ziga xos xususiyatlari 97
9.5. Elektr o'lchash sxemalari uchun transformatorlar 98

II BO'LIM. O'ZGARUVCHAN TOK MASHINALARI NAZARIYASINING UMUMIY MASALALARI

10-BOB. O'ZGARUVCHAN TOK MASHINALARI KONSTRUKSIYASI VA NAZARIYASINING UMUMIY ELEMENTLARI

10.1. O'zgaruvchan tok mashinalari aktiv qismlariga oid umumiy ma'lumotlar 104
10.2. O'zgaruvchan tok mashinalarining stator chulg'ami va uning tarkibiy qismlari 107
10.3. O'zgaruvchan tok mashinalari chulg'amlaridagi elektr yurituvchi kuchlar 118
10.4. O'zgaruvchan tok chulg'amlarining magnit yurituvchi kuchlari 123
10.5. O'zgaruvchan tok mashinasi havo oralig'idagi magnit maydon 128
10.6. O'zgaruvchan tok mashinalarida chulg'am EYK va MYK larining o'zgarish shaklini yaxshilash 131

III BO'LIM. ASINXRON MASHINALAR

11-BOB. ASINXRON MASHINALARDA FIZIK JARAYONLAR

11.1. Asinxron mashinaning tuzilishi, ishlash prinsipi va ish rejimlari 137
11.2. Rotori tormozlangan asinxron mashinada elektromagnit jarayon va rotor chulg'ami parametrlarini stator chulg'amiga keltirish 140
11.3. Rotori aylanayotgan asinxron mashinada elektromagnit jarayon, vektor diagrammasi va almashtirish sxemalari 144
11.4. Uch fazali asinxron motorning energetik diagrammasi 148

12-bob. ASINXRON MASHINANING ELEKTROMAGNIT MOMENTI VA MEXANIK XARAKTERISTIKALARI

12.1. Asinxron mashinaning elektromagnit momenti 150
12.2. Asinxron mashinaning mexanik xarakteristikalari va asinxron motorning turg'un ishlash shartlari 152
12.3. Stator chulg'amiga berilgan kuchlanish $U_1 \neq U_{1N}$ bo'lganda va faza rotorli asinxron motorning rotor chulg'amiga qo'shimcha aktiv qarshiliklar ulangandagi mexanik xarakteristikalar 159

12.4. Magnit maydon yuqori garmonikalarining asinxron motor mexanik xarakteristikasiga ta'siri 160

13-BOB. ASINXRON MOTORNING DOIRAVIY DIAGRAMMASI, ISH XARAKTERISTIKALARI VA ULARNI HISOBLASH USULLARI

13.1. Asinxron motor toklarining doiraviy diagrammasini asoslash ... 163
13.2. Asinxron motorning salt ishlash va qisqa tutashuv tajribalari va xarakteristikalari 165
13.3. Doiraviy diagrammani salt ishlash va qisqa tutashuv tajribalaridan olingan ma'lumotlar bo'yicha qurish 167
13.4. Asinxron motorning ish xarakteristikalari 169
13.5. Asinxron motorlarning ish xarakteristikalarini analitik hisoblash usuli 171

14-BOB. ASINXRON MOTORLARNI ISHGA TUSHIRISH VA AYLANISH CHASTOTASINI ROSTLASH

14.1. Uch fazali asinxron motorlarni ishga tushirish 175
14.2. Ishga tushirish xossalari yaxshilangan uch fazali qisqa tutashgan rotorli asinxron motorlar 179
14.3. Uch fazali asinxron motorlarning aylanish chastotasini rostlash usullari 181

15-BOB. UCH FAZALI ASINXRON GENERATOR

15.1. Asinxron mashinaning generator rejimi 186
15.2. Asinxron generatorning elektr tarmog'i bilan parallel ishlashi 188
15.3. Elektr tarmog'iga ulanmagan asinxron generatorning o'z-o'zini qo'zg'atishi va yuklama bilan ishlashi 189

16-BOB. BIR FAZALI ASINXRON MOTORLAR

16.1. Bir fazali asinxron motorning tuzilishi va ishlash prinsipi 192
16.2. Kondensatorli asinxron motor va uch fazali qisqa tutashgan rotorli asinxron motorni bir fazali manbadan ishlatish 193

17-BOB. ASINXRON MASHINALARNING MAXSUS MAQSADLI VA ZAMONAVIY TURLARI. ASINXRON MOTORLARNI ISHLATISHGA OID AMALIY MASLAHATLAR

17.1. Maxsus maqsadli asinxron mashinalarning ba'zi turlari 195

17.2. Asinxron motorlarning zamonaviy turlari 200

IV BO'LIM. SINXRON MASHINALAR

18-BOB. SINXRON MASHINALARNING KONSTRUKSIYALARI, ISHLASH PRINSIPI VA QO'ZG'ATISH SISTEMALARI

18.1. Sinxron mashinalarning konstruksiyasiga oid umumiy ma'lumot 204
18.2. Sinxron generatorning ishlash prinsipi va qo'zg'atish sistemasining turlari 208

19-BOB. SINXRON GENERATORNING SIMMETRIK YUKLAMA BILAN ISHLASHI VA YAKOR REAKSIYASI

19.1. Sinxron generatorning simmetrik yuklama bilan ishlashidagi elektromagnit jarayonlar 213
19.2. Sinxron generator EYK larining muvozanat tenglamalari va vektor diagrammalari 219

20-BOB. UCH FAZALI SINXRON GENERATORNING AVTONOM REJIMDAGI XARAKTERISTIKALARI

20.1. Salt ishlash, simmetrik qisqa tutashuv va induksion yuklanish xarakteristikalari 228
20.2. Sinxron mashinalarning simmetrik barqaror rejimdagi parametrlari 231
20.3. Tashqi va rostlash xarakteristikalari 237

21-BOB. SINXRON GENERATORLARNING NOSIMMETRIK BARQARORLASHGAN ISH REJIMLARI

21.1. Nosimmetrik yuklamada sinxron generatorning ishi 241
21.2. Sinxron generatorda nosimmetrik qisqa tutashuvlar 244

22-BOB. SINXRON GENERATORDA TO'SATDAN UCH FAZALI QISQA TUTASHUVDAGI O'TISH JARAYONLARI

22.1. Dastlabki ma'lumot va ekvivalent kontur to'g'risida tushuncha 246
22.2. Magnit oqim stator faza chulg'ami bilan ilashmagan ($\psi_{kes} = 0$) holatida to'satdan qisqa tutashuv jarayoni 248

23-BOB. SINXRON GENERATORNING ELEKTR TARMOG'I BILAN PARALLEL ISHLASHI

23.1. Uch fazali sinxron generatorlarni tarmoqqa parallel ulash 254
23.2. Sinxron generatorning elektromagnit quvvati va momenti, burchak xarakteristikalari va aktiv quvvatini rostlash 256
23.3. Elektr tarmog'i bilan parallel ishlayotgan sinxron generatorning statik turg'unligi, sinxronlovchi quvvati va momenti 260
23.4. Sinxron generatorning reaktiv quvvatini rostlash va U-simon xarakteristikalari 261

24-BOB. SINXRON MOTORLAR VA KOMPENSATORLAR

24.1. Sinxron motorlarga oid dastlabki ma'lumot va ishlash prinsipi 264
24.2. Sinxron motorning burchak va U-simon xarakteristikalari 265
24.3. Sinxron motorning ish xarakteristikalari 267
24.4. Sinxron motorlarni ishga tushirish usullari 269
24.5. Sinxron kompensator va uning elektr ta'minoti sistemasida quvvat koeffitsienti cosj ni yaxshilashi 271

25-BOB. SINXRON MASHINALARNING ISTIQBOLLI TURLARI

25.1. Dastlabki ma'lumot 274
25.2. Magnitlanish o'qi buriladigan sinxron mashinalar 274
25.3. O'ta o'tkazuvchan qo'zg'atish chulg'amli sinxron mashinalar 277
25.4. Katta quvvatli istiqbolli sinxron mashinalar 278

26-BOB. MAXSUS MAQSADLI SINXRON MASHINALAR. SINXRON MASHINALARNI ISHLATISHGA OID AMALIY MASLAHATLAR

26.1. Induktorli generatorlar 281
26.2. Avtomobil va traktorlarda hamda temiryo'l vagonlarida keng qo'llaniladigan changalsimon qutbli sinxron generatorlar 283
26.3. Avtomatika qurilmalarida ishlatiladigan sinxron motorlarning ayrim turlari 285

V BO'LIM. O'ZGARMAS TOK MASHINALARI

27-BOB. O'ZGARMAS TOK MASHINALARINING KONSTRUKSIYASI VA ISHLASH PRINSIPI

27.1. O'zgarmas tok mashinalarining tuzilishi va ishlash prinsipi 290
27.2. Yakor chulg'amlari va ularning turlari 296

27.3. O'zgarmas tok mashinalari chulg'amlarini hisoblash tartibi 302
27.4. Sirtmoqsimon chulg'amlar 302
27.5. To'lqinsimon chulg'amlar 307
27.6. O'zgarmas tok mashinalari yakor chulg'amlarining turlarini taqqoslash va ularni tanlash 310

28-BOB. O'ZGARMAS TOK MASHINASINING MAGNIT MAYDONI VA YAKOR REAKSIYASI

28.1. O'zgarmas tok mashinasining generator rejimidagi magnit maydoni 312
28.2. Yakor reaksiyasining salbiy ta'siri va uni bartaraf qilish 315

29-BOB. KOLLEKTORLI O'ZGARMAS TOK MASHINALARIDA KOMMUTATSIYA

29.1. Kommutatsiyaning fizik asoslari 316
29.2. Kommutatsiyaning zararli ta'sirini kamaytirish usullari 319
29.3. Kommutatsiyani tekshirish va sozlash 320

30-BOB. O'ZGARMAS TOK GENERATORLARINING XARAKTERISTIKALARI

30.1. Mustaqil qo'zg'atishli o'zgarmas tok generatorining xarakteristikalari 323
30.2. Parallel qo'zg'atishli o'zgarmas tok generatorining o'z-o'zini qo'zg'atishi va normal rejimdagi xarakteristikalari 328
30.3. Aralash qo'zg'atishli o'zgarmas tok generatorining xarakteristikalari 332

31-BOB. O'ZGARMAS TOK MOTORLARI

31.1. Ishlash prinsipi va ish jarayonining asosiy tenglamalari 335
31.2. O'zgarmas tok motorlarini ishga tushirish 338
31.3. O'zgarmas tok motorlarining ish xarakteristikalari 343
31.4. O'zgarmas tok motorlarining mexanik xarakteristikalari 350
31.5. O'zgarmas tok motorlarining rostlash xarakteristikalari 353
31.6. O'zgarmas tok motorlari aylanish chastotasini rostlashning zamonaviy usullari 358

32-BOB. MAXSUS MAQSADLI VA ZAMONAVIY O'ZGARMAS TOK MASHINALARINING AYRIM TURLARI

32.1. O'zgarmas tok taxogeneratorlari 362
32.2. Ijrochi o'zgarmas tok motorlari 363

32.3. O'zgarmas tok mashinalarining zamonaviy turlari 365

VI BO'LIM. ELEKTR MASHINALARI UCHUN UMUMIY BO'LGAN MASALALAR

33-BOB. ELEKTR MASHINALARI VA TRANSFORMATORLAR AKTIV QISMLARINI TAYYORLASHDA QO'LLANILADIGAN ASOSIY MATERIALLAR. ELEKTR MASHINALARIDA MAGNIT ZANJIRLAR

33.1. Magnit materiallar 369
33.2. Elektr o'tkazuvchi, o'ta o'tkazuvchan va
krioo'tkazgich materiallar 369
33.3. Elektr izolatsiya materiallari 371
33.4. Elektr mashinalarining magnit zanjiri va
uni hisoblash tartibi 372

34-BOB. ELEKTR MASHINALARI VA TRANSFORMATORLARDA QUVVAT ISROFLARI HAMDA ULARNING FOYDALI ISH KOEFFITSIENTI. ELEKTR MASHINALARINING QIZISHI VA ULARNI SOVITISH

34.1. Elektr mashinalarida va transformatorlada quvvat isroflari 377
34.2. Elektr mashinalarining qizishi. Ish rejimlari 383
34.3. Umumiy maqsadli elektr mashinalarini sovitish 387
34.4. Turbogeneratorlar va gidrogeneratorlarning
sovitish sistemalari 392
Foydalanilgan adabiyotlar 396

J. S. SALIMOV, N. B. PIRMATOV

ELEKTR MASHINALARI

(darslik)

Muharrir *Z. Mirzahakimova*
Musahhih *H. Zokirova*
Sahifalovchi *N. Mamanov*

O'zbekiston faylasuflari milliy jamiyati nashriyoti.
100029, Toshkent shahri, Matbuotchilar ko'chasi, 32-uy.
Tel: 236-55-79; faks: 239-88-61.

Nashriyot litsenziyasi: AI №110, 15.07.2008.

Terishga berildi 06.03.2011. Bosishga ruxsat etildi 30.06.2011. «Tayms» garniturasi. Ofset usulida chop etildi. Qog'oz bichimi 60x84 $^1/_{16}$. Shartli bosma tabog'i 26,4. Nashr hisob tabog'i 25,5. Adadi 400 nusxa. Bahosi shartnoma asosida. Buyurtma № 25.

«START-TRACK PRINT» MCHJ bosmaxonasida chop etildi.
Manzil: Toshkent shahri, 8-mart ko'chasi, 57-uy.